

飞秒激光直写三维光波导的应用与挑战(特邀)

李泽政¹, 郭帅鹏¹, 蒋闯², 柯少林², 田振男^{1*}¹吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012;²武汉工程大学光学信息与模式识别湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205

摘要 得益于飞秒激光直写技术的穿透式真三维改性加工能力,多种介质内任意三维路径及截面形状的光波导得以实现并得到了重要应用。本文围绕飞秒激光直写光波导的机理及基本类型,综述了三维光波导器件在光通信、集成量子光学、拓扑光子学、天文光子学以及光学传感等领域的应用。从三维光子芯片的应用需求入手,总结了飞秒激光直写技术在低损耗、任意截面、大纵深直写和可重构三维波导制备中面临的挑战,并展望了飞秒激光直写三维光波导的未来发展趋势。

关键词 集成光学; 光子集成芯片; 飞秒激光直写; 三维光波导

中图分类号 TN249 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL231285

1 引言

后摩尔时代,随着人工智能、自动驾驶和高速计算等新兴应用的发展,人类社会产生、处理、传输、存储信息的速度与日俱增^[1]。近年来,随着光子集成回路(PICs)的快速发展,人们将有能力以低功耗实现超高速的信息传输和高并行度的信息处理^[2-4]。其中,除了已取得巨大进展的平面集成光子线路外,以三维路径排布及任意截面形状为基础的三维架构集成光子线路(3D PICs)得到了快速发展。与二维光波导器件相比,三维光波导器件不仅能够为光子芯片提供新型的三维架构,实现三维立体集成,还能够基于光波导阵列内光子传输方程与薛定谔方程的高度相似性,实现复杂物理过程和极端苛刻物理现象的模拟。同时,三维光波导器件也是具有任意截面形状的组合波导器件,可以实现光子的多自由度充分利用。凭上述优势,3D PICs在光通信^[5]、集成量子光学^[6]、拓扑光学^[7]、天文光子学^[8]与光学传感^[9]等领域实现了重要应用,如图1所示。

目前,飞秒激光直写(FsLDW)是在透明材料内制备三维光波导最有效的技术之一。与传统的光刻、电子束光刻(EBL)等平面波导加工技术相比,飞秒激光直写技术在进行三维波导加工时具有精度较高、工艺简单、成本较低且流片快的优点。需要说明的是,激光直写波导较小的折射率衬度($\approx 10^{-3}$)虽然使波导与光纤网络的对接损耗大大降低,但却使激光直写光子芯

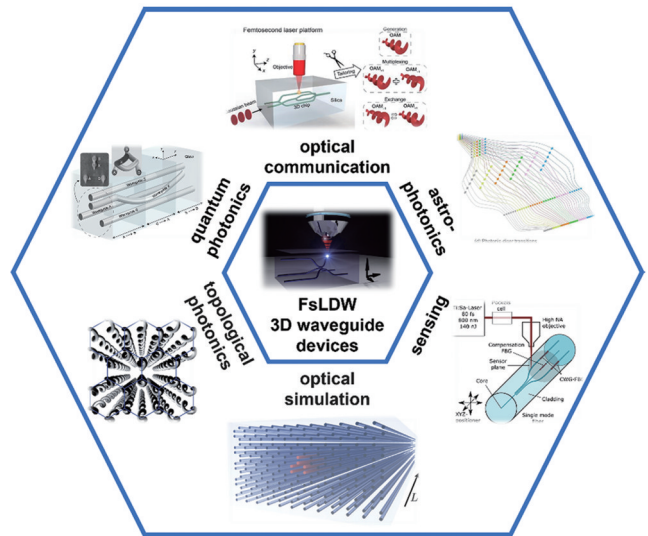


图1 飞秒激光直写的三维光波导器件^[5-9]

Fig. 1 Three-dimensional optical waveguide devices fabricated by FsLDW technique^[5-9]

片的集成度与硅基芯片相比较低。1996年, Davis等^[10]首次利用飞秒激光脉冲在高硅、硼酸盐和氟化锆酸盐(ZBLAN)等玻璃内引入永久折射率衬度,形成了波导结构。在此后的20多年内,飞秒激光直写三维光波导作为新兴领域迅速发展,目前国内外已有上千篇相关报道。当前,激光直写三维光波导的性能已经取得了巨大进步:折射率改变量为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ ^[11],传输损耗可低至 0.1 dB/cm ^[12],波导纵深可达 1.1 mm ^[13],导光

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-11-27; 录用日期: 2023-12-05; 网络首发日期: 2023-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(62375103, 62131018)、国家重点研发计划(2021YFF0502701)、吉林省科技发展计划(20220301002GX, 20230508110RC)

通信作者: *zhennan_tian@jlu.edu.cn

范围覆盖可见光至中红外波段^[14-16]。这些优异性能为各种新奇的三维光波导器件的演示打下了坚实的基础。

围绕飞秒激光直写光波导的机理,笔者首先介绍了激光直写光波导的基本类型;然后阐述了飞秒激光直写三维光波导在各领域的独特优势,并依次综述了其应用及近期的进展;接着从三维光子芯片的应用需求入手,总结了飞秒激光直写技术在制备低损耗、任意截面、大纵深和可重构三维波导中面临的挑战;最后展望了飞秒激光直写三维光波导的未来发展趋势。

2 飞秒激光直写光波导

飞秒激光直写依赖于紧聚焦的飞秒脉冲对材料的光学改性。紧聚焦飞秒脉冲与不同材料的相互作用机理决定了三维波导的几何结构与性能参数,进而决定了三维波导器件的基本构型。

2.1 飞秒激光与透明介质的作用机理

目前,脉冲激光与材料相互作用仍缺少被广泛认可的统一的物理模型,但可以通过三个主要过程来简化激光诱导材料改性的过程。这三个过程是自由电子等离子体的产生、能量弛豫以及材料改性。

当被聚焦的飞秒激光脉冲的波长大于材料吸收波长时,光子能量不足以使宽带隙介质发生线性吸收,价电子将以非线性光电离或雪崩电离的方式跃迁到导带,产生自由电子等离子体。非线性光电离包括多光子电离和隧穿电离。当多光子电离发生时,如果价带电子吸收 m 个能量为 $h\nu$ 的光子,且满足 $m \cdot h\nu > E_g$ (E_g 为材料禁带宽度)时,价带电子将会跃迁至导带,如图 2(a) 所示。当激光强度较低且频率 ν 较高(低于发生单光子吸收时的频率)时,多光子吸收为主导过程;而当激光强度较高且频率 ν 较低时,强场使能带结构扰动,减小了价带和导带之间的势垒,此时价带电子主要通过量子隧穿效应直接跃迁到导带,即隧穿电离,如图 2(b) 所示。多光子电离与隧穿电离同时存在,二者为竞争关系,可以用相同的理论框架(即 Keldysh 参数^[17])来描述。Keldysh 参数的表达式为

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{m_e c n \epsilon_0 E_g}{I}}, \quad (1)$$

式中: ω 为激光频率; e 为基本电荷; I 为焦点处的激光强度; m_e 为电子有效质量; c 为光速; n 为材料的折射率; ϵ_0 为真空介电常数。当 $\gamma \gg 1.5$ 时,多光子电离是主要机制;当 $\gamma \ll 1.5$ 时,隧穿电离为主导机制;当 $\gamma \approx 1.5$ 时,这两种过程的影响相当。除了以多光子电离和隧穿电离为代表的非线性光电离过程外,雪崩电离也可以产生自由电子等离子体。材料中的杂质热激发、缺陷态存在以及价带电子的非线性吸收会促使导带中产生一定数量的种子电子,种子电子通过自由载流

子吸收多个光子跃迁至高能级形成热电子。当热电子的动能大于禁带宽度时,其通过与价带束缚电子碰撞在导带最小值处产生两个激发态电子,如图 2(c) 所示。

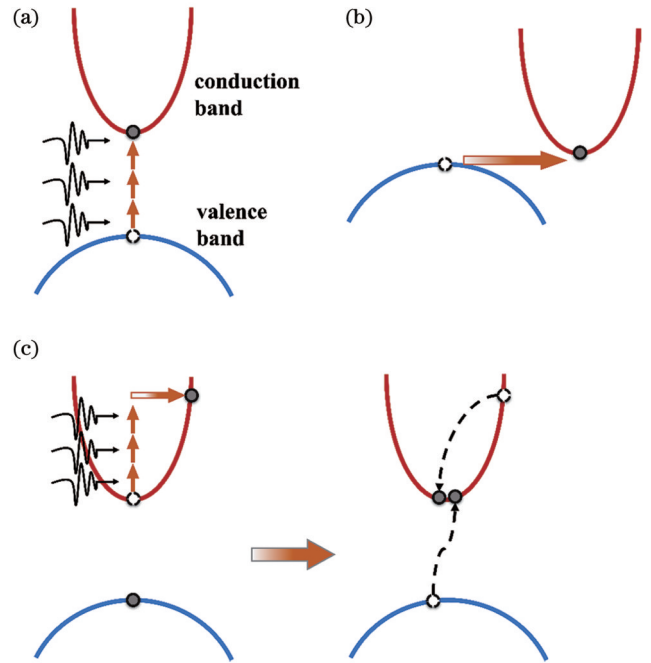


图 2 自由电子等离子体产生示意图。(a)多光子电离;(b)隧穿电离;(c)雪崩电离

Fig. 2 Schematics of the free electron plasma formation. (a) Multiphoton ionization; (b) tunneling ionization; (c) avalanche ionization

Lenzner 等^[18]发现:对于极短脉冲激光,比如在熔融石英中小于 10 fs 以及在硼硅酸盐玻璃中小于 100 fs 的脉冲,其需要更少的能量就可以实现光学击穿,因而仅凭非线性光电离就可以产生足够的自由电子等离子体。相反,当较长脉冲激光作用于宽带隙材料(如蓝宝石)时,雪崩电离的贡献会更显著^[19]。

在产生足够的自由电子等离子体后,热电子通过能量弛豫过程与声子碰撞将能量转移到晶格中,引起材料改性,改性效果与入射激光能量、材料自身属性密切相关。入射脉冲能量略高于改性阈值即可在焦点内产生适量的等离子体。等离子体与大量声子参与的能量弛豫过程结束后,焦点处将产生均匀的折射率升高区域,这种折射率改变类型称为 I 型折射率改变 (Type I)^[20]。当入射脉冲能量较高 ($> 1 \mu\text{J}$) 时,焦点区域产生的大量等离子体将以离子冲击波和库仑爆炸的形式挤压焦点周围的材料。该过程会导致焦点区域材料密度减小或产生空洞,而焦点周围的材料因接收额外的离子和挤压而被致密化。这种焦点处折射率降低的折射率改变类型称为 II 型折射率改变 (Type II)^[21-22]。Type I 折射率改变常见于 PMMA^[23]、熔融石英^[24]、多组分硅酸盐^[25-29],以及少量晶体(如 Nd:YAG^[30]、BGO^[31]、LiTaO₃^[32]、LiNbO₃^[33-34]等)中,而

Type II 折射率改变常见于大部分晶体中^[35-41]。

2.2 激光直写光波导的基本类型

光波导是由低折射率的包层及其包裹的高折射率芯层构成的。根据不同的激光直写折射率改变类型,飞秒激光直写波导可以分为直写折射率升高型波导、应力挤压双线型波导、凹陷包层型波导和烧蚀脊形波导 4 类^[42]。

1) 直写折射率升高型波导。基于 Type I 型折射率改变,聚焦的飞秒激光脉冲在焦点处引起折射率均匀升高($\Delta n > 0$),同时周围未辐照区域的折射率保持不变,因此,波导位于飞秒激光写入的轨迹处,如图 3(a)所示。由于扫描轨迹即为波导,因此能方便地在介质内直接写入三维光波导器件,如多臂耦合器、波导阵列等。此类型波导通常在 PMMA^[23]、熔融石英^[24]、多组分硅酸盐^[25-29]以及部分晶体中^[30-34]制备。对于晶体材料而言,焦点区域的 e 光折射率增加,此种波导仅能实现 TM 光的低损耗传输^[32,34,43-44]。

2) 应力挤压双线型波导。双线型波导由两条基于 Type II 型折射率改变的结构构成。Type II 型折射率改变导致材料焦点处的晶格膨胀并挤压周边区域。应力挤压双线型波导的导光区域位于飞秒激光写入双线的内侧,双线的长度约为 15~30 μm ,间隔约为 10~20 μm ,如图 3(b)所示。应力挤压双线型波导的导光区域因受挤压效应影响而具有明显的双折射,垂直于双线方向的折射率高于平行于双线方向的折射率。相对于本体材料,平行于双线方向的折射率没有显著升高。因此,应力挤压双线型波导对偏振方向垂直于双线的 photons 具有明显的束缚作用,而对偏振方向平行于双线的 photons 的束缚作用很弱,甚至不导光^[33,45-47]。

3) 凹陷包层型波导。凹陷包层波导由一系列环形排布的 Type II 型折射率改变结构及其内部的未加工闭合区域构成。低折射率环形结构的间隔在微米量级,这些结构构成了波导准连续的低折射率包层。内部未加工区域的折射率高于外部环形结构,形成波导的芯层。由于内部区域不存在激光直写造成的折射率不均和缺陷,凹陷包层型波导的损耗仅由材料的本征吸收决定,通常比 Type I 型波导更低。理论上,可以利用这种写入轨迹构成任意形状的波导截面,但实际上,这种波导通常被设计成环形排布结构,如图 3(c)所示。为了缩短多条写入轨迹的加工时间,Qi 等^[46]采用 4 根 Type II 型轨迹构成了“井”字形排布的凹陷包层型波导,不仅极大地提高了加工效率,还实现了波导截面尺寸的控制。与应力挤压双线型波导相比,凹陷包层型波导的最大优势是同时支持 TM 和 TE 两种偏振^[40,48]。在具有优良光学特性的 LiNbO₃^[39]和 Nd:YAG^[49]等立方晶体中,凹陷包层型波导是理想的偏振无依赖的片上集成激光器及光放大部件。

4) 烧蚀脊形波导。烧蚀脊形波导由高能量飞秒脉冲烧蚀离子掺杂薄层材料表面制备而成。通过烧蚀

去除表层材料可形成脊形波导两侧的低折射率区域,如图 3(d)所示,而通过控制两烧蚀线的距离可以控制波导宽度。目前,研究人员已经在 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ^[50]、Nd:GGG^[51]、Nd:YAG^[52]、Nd:GdCOB^[53]、Nd:MgO:LiNbO₃^[54]和 TiO₂^[55]等晶体材料中通过烧蚀制备了脊形波导,实现了波导激光和频率转换等功能。

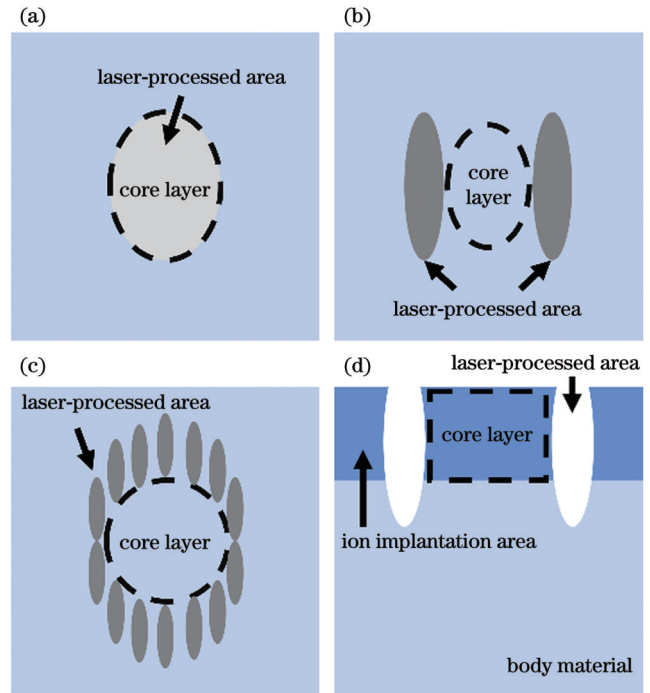


图 3 飞秒激光直写的波导截面示意图(黑色虚线内为波导芯位置)。(a)直写折射率升高型波导;(b)应力挤压双线型波导;(c)凹陷包层型波导;(d)烧蚀脊形波导

Fig. 3 Schematics of the cross-section images of waveguides fabricated by FSLDW (the areas within the black dash lines represent the location of waveguide core). (a) Direct-written refractive index elevated waveguide; (b) stress-extruded dual line waveguide; (c) depressed cladding waveguide; (d) ablated ridge waveguide

直写折射率升高型波导和凹陷包层型波导在构型和波导截面上具有较高的灵活性,所以三维光波导器件通常都是由这两种波导构成的。

3 三维光波导的应用

3.1 光通信

光纤是信息驱动型社会的骨干,而单模光纤是长距离高速光通信的关键。目前,通信技术的发展日新月异,网络数据传输需求呈指数增长,而这就要求发展新技术来进一步提高传输容量并避免“数据紧缩”^[56]。其中,最具有前景的技术就是空分复用(SDM)^[1,57],它的基本思想是将多个单模纤芯包裹在同一包层中的多芯光纤(MCF)或者少模光纤(FMF)中进行信息传递。在这两种情况下,传输容量的大小分别与 MCF 的单模纤芯的数量或 FMF 所支持的模式的数量成正比。在

光通信网络中使用 MCF 与 FMF 时,会不可避免地需要使用三维光波导器件,包括扇入扇出(FIFO)器件、三维分束器件以及模式控制器件等。这些不同的三维光波导器件在光通信网络中发挥着重要作用,下面将分类进行介绍。

FIFO 器件是 MCF 在输出与输入时将二维排列的纤芯等间距地排列至一维平面,从而与激光器、调制器等对接的重要器件。目前,主要有基于体光学元件的自由空间 FIFO 器件^[58]、光纤 FIFO 器件^[59-60]以及片上 FIFO 器件^[61-62]。其中,前两者分别存在体积庞大以及工艺复杂且不利于大规模制造的问题,而基于芯片的片上 FIFO 器件因尺寸小、可扩展性高、插入损耗较低而备受青睐。对于任意排列分布的二维 MCF,可以利用飞秒激光直写技术(该技术可在材料内部实现 Type I 型折射率变化)制备出具有三维构型的 FIFO 器件。Thomson 等^[63]首次利用飞秒激光在多组分石英玻璃片中制备出了匹配 2×2 方形纤芯阵列 MCF 的 FIFO 器件。如图 4(a)所示, FIFO 器件与 MCF 对接端的 4 根直波导位于边长为 $50 \mu\text{m}$ 的正方形顶角上,平行出射端的 4 根波导排列成一维阵列且间距为 $250 \mu\text{m}$ 。在 1539 nm 工作波长下,与 MCF 对

接的通道平均插入损耗约为 5 dB 。2012 年, Thomson 等^[64]又展示了基于光子灯笼(PL)的匹配 121 芯 MCF 的 FIFO 器件,如图 4(b)所示,其与 MCF 耦合后单通道平均插入损耗约为 7 dB 。除了制备单独的 FIFO 器件外,研究人员^[65]在用于观察 N00N 态布洛赫振荡的光量子芯片的出射端设计了扇出器件,以便将每一路与单独的单光子探测器相连,如图 4(c)所示。随着飞秒激光直写技术的逐渐改进与成熟,飞秒激光直写波导的损耗也在逐渐降低。2023 年, Wang 课题组^[66]基于狭缝整形技术,利用飞秒激光直写在熔融石英内直写了匹配 19 芯 MCF 的 FIFO 器件,如图 4(d)所示。通过设计扫描顺序规避了直写时的影子效应,而且每个信道采用了幂函数而非普通的圆弧作为描述波导弯曲的函数。将两个 FIFO 器件与 1 km 19 芯光纤首尾对接进行表征,测得单个 FIFO 器件在整个 C+L 波段的平均端口插入损耗低至 0.88 dB ,信道间串扰不高于 -29.1 dB ,展现出了低插入损耗、宽带和低串扰的特点。未来,随着器件设计和加工参数的优化以及 FIFO 器件与 MCF 耦合技术的提升, FIFO 器件的损耗最终会降低至可实用化的水平。

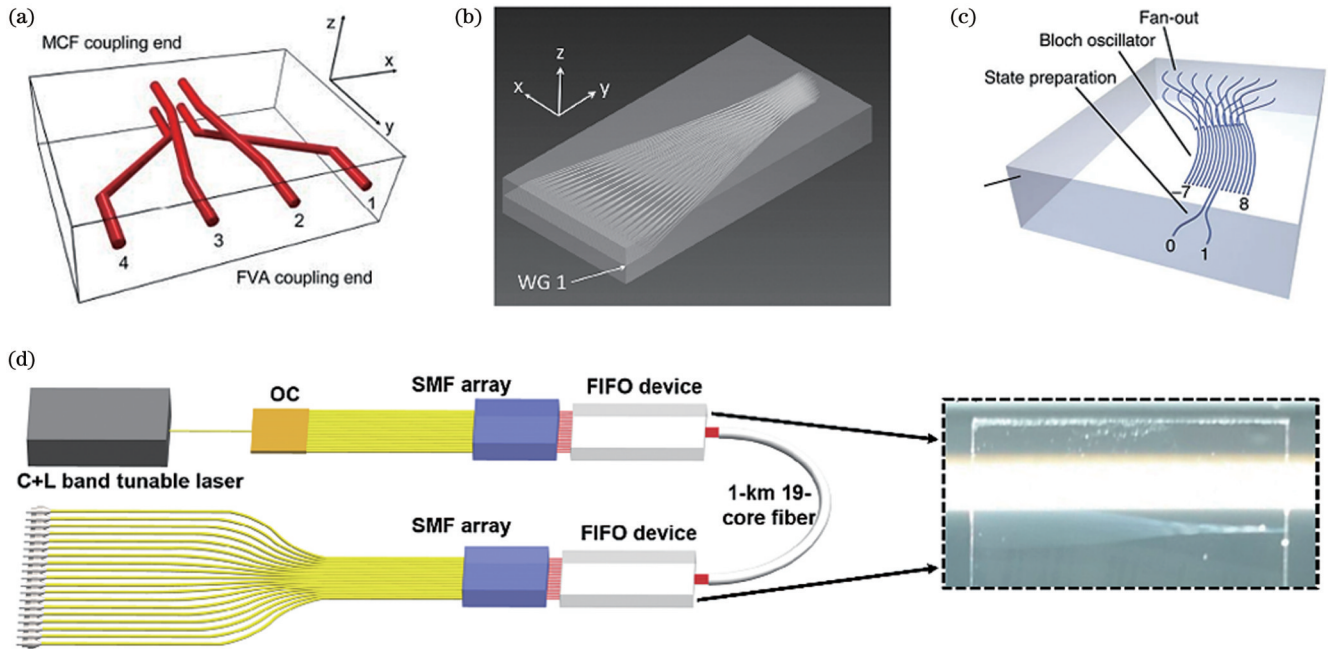


图 4 飞秒激光直写 FIFO 器件。(a)首个采用飞秒激光直写制备的匹配 4 芯光纤的 FIFO 器件的示意图^[63]; (b)基于光子灯笼的匹配 121 芯光纤的 FIFO 器件示意图^[64]; (c)用于观察 N00N 态布洛赫振荡的光量子芯片中的扇出器件^[65]; (d)利用飞秒激光直写制备的匹配 19 芯光纤的宽带、低插入损耗 FIFO 器件^[66]

Fig. 4 FIFO devices fabricated by FsLDW technique. (a) Sketch of the first FsLDW FIFO device for 4-core fiber^[63]; (b) schematic of an FIFO device for 121-core fiber based on a photonic lantern^[64]; (c) a fan-out device in optical quantum chips for the observation of N00N state Bloch oscillations^[65]; (d) FsLDW prepared FIFO device with board-bandwidth and low insertion loss for 19-core fiber^[66]

模式控制器件,包括模分复用/解复用器^[67-69]、模式转换器^[70-71]、过滤器^[72]、模式路由器^[73]等,是实现光子模式编码与控制的基础器件。与二维光子模式控制

器件相比,基于飞秒激光直写的三维模式控制器件不仅可以直接与光纤网络实现高效对接耦合,还可以实现垂直对称线性偏振(LP)模式(如 LP_{11b} 模式)的高效

产生和复用。目前,主要有 4 种激光直写的模式控制器件,即非对称定向耦合器(ADC)^[74-75]、锥形耦合器^[76-77]、光子灯笼模式转换器^[78-79]以及 Y 分支型模式转换器^[5,80]。Riesen 等^[74]对飞秒激光直写的 ADC 的竖直和水平臂的单脉冲能量及耦合长度进行参数优化后,演示了三维组合 ADCs,使得 LP_{11a}和 LP_{11b}的转换效率在 1580 nm 分别达到了 70% 和 40%。2020 年, Jin 课题组^[75]演示了首个激光直写的片上涡旋光(OAM 光)产生器,一根单根波导与“甜甜圈”型 OAM 波导构成 ADC,如图 5(a)所示。在单根波导端口通入平面光,当单根波导中的高斯基模有效折射率与 OAM 波导中的涡旋光模式有效折射率相等时,基模逐渐转换为 OAM 模式。通过设计 AOM 波导的半径为 3.5 μm 和 5 μm,便可在 OAM 波导中产生拓扑核数(*l*)分别为 ±1 和 ±2 的 OAM 模式。然而,ADC 需要精确控制波导尺寸和耦合长度来保持相位匹配条件,因此其对于制造误差的容忍度较低。相反,由于较长的绝热锥形波导的过渡作用,基于光子灯笼和锥形耦合器的模式转换器具有超宽的工作带宽并且对制造缺陷不敏感。2014 年, Gross 等^[76]展示了如图 5(b)所示的锥形模式耦合器。多模波导 MM 在耦合区逐渐变细直至变成单模波导的同时,单模波导 SM 逐渐变粗,这使得在解复用 LP₀₁与 LP₁₁模式时任何的 LP₁₁不耦合功率都会被

辐射损耗掉,从而避免了多模波导中的 LP₀₁基模信道被损坏。该耦合器在超大带宽(500~900 nm)内实现了 99% 以上的耦合比率、高于 20 dB 的模式消光比以及小于 2 dB 的插入损耗。这类器件通常需要很长的绝热转换区来实现模式的转换,导致器件尺寸难以进一步缩小。Y 分支型模式转换器通过将高斯模式均匀分至不同路径后分别控制其相位,合束后产生高阶模式的方法,能以小体积实现较高的转换效率和较低的串扰,最近受到广泛关注。2023 年, Li 等^[80]基于圆形波导组合的方法制备了不同截面的波导,实现了均匀分束、定量相位延迟引入以及多模传输功能。通过控制 Y 分支分别在水平和垂直方向上合束,在片上以 1.53 dB 和 3.51 dB 的插入损耗产生了 LP_{11a}和 LP_{11b}模式,转换效率约为 90%。同年, Wang 等^[5]利用 Y 分支在片上产生了对角与反对角的 LP 模式,这两种模式进一步被分解为 TE₀₁和 TE₁₀模式, TE₀₁和 TE₁₀模式经过同一沟槽波导后分别产生 π/2 和 -π/2 的相位差,从而在出射端完成了 OAM₋₁和 OAM₊₁模式的干涉输出,如图 5(c)所示。借助飞秒激光直写技术,研究人员可以直写出任意的三维 Y 分支结构,用于拓展片上产生的模式阶数。未来,根据所需实现的器件要求(如低损耗、大带宽、高转换效率、小体积等),人们可以按需选择激光直写的模式产生器的结构。

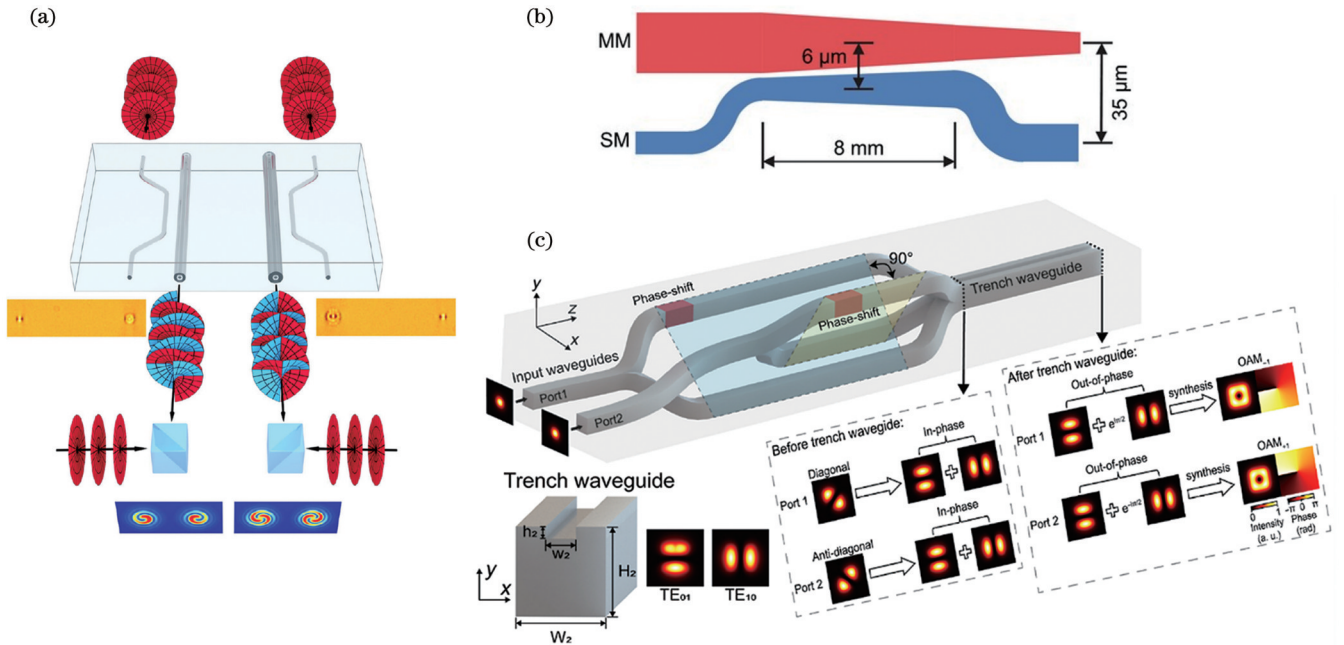


图 5 飞秒激光直写模式控制器件。(a)首个激光直写的片上 OAM 光产生器^[75]; (b)锥形模式选择耦合器示意图^[76]; (c)基于沟槽的 OAM 模式复用器的概念和原理^[5]

Fig. 5 Mode controlling devices fabricated by FSLDW technique. (a) Schematic of the first FSLDW OAM beam emitter^[75]; (b) schematic of tapered couplers^[76]; (c) concept and principle of the trench-based OAM mode multiplexer^[5]

分束器是光通信网络中用于信号路由和信号处理的重要元件。1×N 波导分束器可以将来自光纤的信号光从一个输入端口均匀分至 N 个输出端口。相比于平面 1×N 分束器,三维 1×N 波导分束器在结构上更

加紧凑,不仅提高了芯片集成度,还可以实现光子集成回路中层间器件的互连^[81-85]。早期,三维分束器的工作主要是在各种玻璃衬底上开展的。2003 年, Nolte 等^[81]首次利用飞秒激光在熔融石英中直写出了三维

1×3分束器,其三个输出端口在1.05 μm输入光条件下为单模,分光比为32:33:35。为了提高直写速度,2010年,Sakakura等^[83]利用空间光调制器(SLM)调制出多个焦点,通过加载不同的相位图控制焦点间距,一次直写出了1×3、1×4和1×6单模分束器,如图6(a)所示。此外,研究人员通过优化直写参数,分别在LiNbO₃^[86]和BGO^[31]晶体内制备了基于Type I折射率改性的三维分束器。其中,基于多次扫描的BGO分束器具有高的偏振无依赖特性,而LiNbO₃分束器的o光折射率减小使得其无法传输TM光。相比之下,由于在保留体材料非线性特性的同时又能实现导光,基于Type II折射率改变的晶体三维分束器最近受到了广泛关注。Ajates等^[87]利用凹陷包层型波导构成了三维LiNbO₃分束器,如图6(b)所示,其在633 nm和850 nm下具有良好的导光特性,但由于凹陷薄层波导由多个扫描轨迹构成,此种三维波导器件的制作十分耗时。为了解决上述问题,Lü等^[88]设计了一种“光子晶格型”

包层结构并将其用于制备三维晶体分束器。如图6(c)所示,分束器包层通常为六边形Type II改性线。Lü等^[88]在保持包层最外围横截面不变的条件下,通过控制内部Type II改性线的分布,构建出不同的过渡结构,使入射端的单端口逐渐过渡到多个输出端口,从而大大提高了制备效率。在1550 nm测试光下,该LiNbO₃分束器的分束比为0.50:0.49:0.51,如图6(d)所示,传输损耗约为2 dB/cm。2016年,Nie等^[89]在KTP晶体中制备了有源1×4分束器,其在632.8 nm光输入下的损耗仅为1.3 dB,与相同包层的直波导的损耗相近。在1064 nm连续光输入时,4个输出端均可以检测到532 nm的二次谐波,测得归一化倍频效率约为14 %/W,不仅比具有相同包层的直波导(约为11 %/W)高,而且是之前离子辐射制得的平面KTP波导(约为5.3 %/W)的两倍多。未来,人们可以根据分束器的应用场景(仅分束或有源泵浦等)选择相应的材料制备分束器。

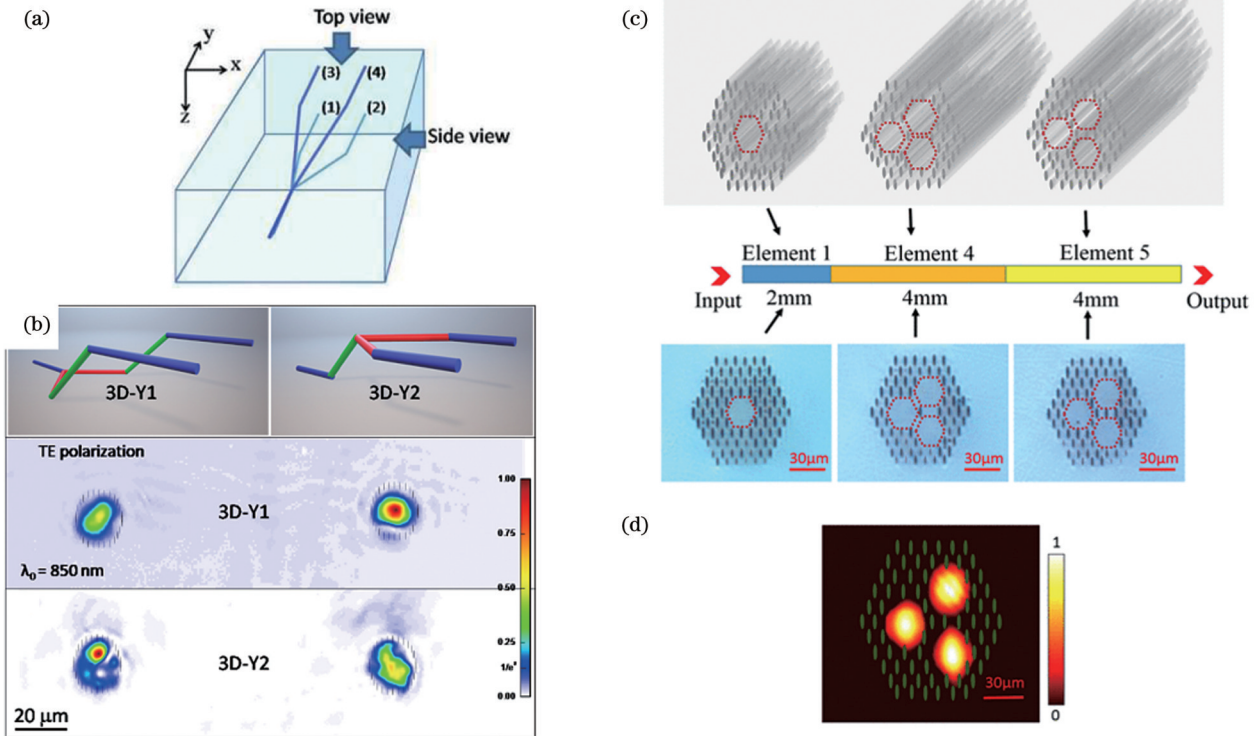


图6 飞秒激光直写1×N分束器。(a) SLM辅助一次直写的1×4分束器示意图^[83]; (b)基于凹陷包层型波导的三维LiNbO₃分束器^[87]; (c)(d)光子晶格型分束器示意图及其出射端模场图片^[88]

Fig. 6 1×N splitters fabricated by FsLDW technique. (a) Schematic of the SLM-assisted single-sweep laser direct-written 1×4 splitter^[83]; (b) schematic of three-dimensional LiNbO₃ splitter based on depressed cladding waveguide^[87]; (c)(d) schematic of splitter with the optical-lattice-like cladding and its output modal profile^[88]

3.2 集成量子光学

近年来,得益于光波导技术的发展,量子光学系统逐渐走向小型集成化,与体量子系统相比在稳定性和可扩展性上具有巨大优势^[90-91]。基于飞秒激光直写技术的光子芯片不仅可以实现任意三维光子线路,避免波导交叉,而且可以通过调节波导双折射量级以及光

轴角度,实现偏振态保护和控制,从而成为实现偏振编码量子协议与算法的强大实验平台。凭借上述优势,三维光波导器件主要在光量子逻辑门、光量子行走芯片以及光量子算法芯片等方面得到了重要应用。

光量子逻辑门是构建量子计算机的量子回路的基石,它由分光比不同的定向耦合器(DC)组成。光子态

在经过耦合器时发生干涉叠加,从而实现量子计算。近年来,人们在二维飞秒激光直写光子芯片中实现了两比特干涉量子逻辑门,如路径和偏振编码的受控非门(CNOT 门)^[92-93]、受控相位门(CZ 门)^[94]等。2013 年,Osellame 课题组^[95]制备出了均匀分光的三耦合器 tritter。通过对 tritter 输入 $|1, 1, 1\rangle$ 的三光子 Fock 态,在实验上首次观察到了三个全同光子的玻色子聚合。将所得干涉可见度与经典双光子干涉所得可见度进行对比后发现二者有着明显的区别,从而验证了观察到的是三光子干涉现象。基于三维多臂耦合器,有望构建出更加复杂的量子逻辑门。最近, Li 等^[96]基于飞秒激光直写技术制备了第一个光量子三比特 Toffoli 量子逻辑门。他们通过引入三维“拱桥”波导设计,消除了路径间不必要的交叉和耦合,大大提升了芯片的性能,如图 7(a)所示。输入三比特 qutrit 态后,测得 Toffoli 门的保真度为 85.5%。进一步, Li 等利用三维“拱桥”波导设计并制备了基于四量子比特 ququart 的 CCCNOT 门,充分展现了飞秒激光直写技术的三维直写能力在制备多比特量子逻辑门上的优越性。2022 年, Zhang 等^[6]设计了如图 7(b)所示的三维波导阵列,通过在 Z 方向上调节波导 X 与波导 A、B 和 S 之间的距离来调节它们之间的耦合系数,使得光子由 A 输入时耦合至 B 端口出射,而由 B 端口输入时则会演化至 A 端口出射并积累 π 的几何相位,从而完成两任意子的编织。编织过程中几何相位积累组成的贝里相位矩阵正好对应量子逻辑 Y 门,因此有望利用该结构实现拓扑保护的量子计算。

量子行走是经典随机行走在量子领域的拓展,包括离散时间量子行走和连续时间量子行走。由于相干叠加和量子干涉的作用,量子行走不仅表现出了与经典随机行走明显不同的行为,而且在量子搜索和量子模拟应用中与经典行走相比具有指数优势。通过扩大量子行走的光子数或演化网络的尺寸就可以扩展其希尔伯特空间,从而增强量子算法在解决问题时所需时间更短的优势。2014 年, Poullos 等^[97]在“十字”排列的三维波导阵列的 1、2 和 2、6 端口分别通入全同光子和非全同光子,实现了具有高可见度的双光子量子干涉。然而,由于光子不能在对角线等其他方向上自由传输,因此所实现的量子行走在严格意义上不能算是二维连续时间量子行走。2018 年, Tang 等^[98]首次利用飞秒激光直写制备了 49×49 (由 2401 个格点组成) 的大规模二维波导阵列,如图 7(c)所示,并在实验上首次观察了波导阵列中真正意义上的单光子二维连续时间量子行走演化,实验和理论得到的初始位置概率与行走距离 (z) 呈负平方函数关系,这种复杂网络的量子行走有望用于解决经典情况下难以处理的问题。2021 年, Max 等^[99]通过将两根波导组合的方式向波导中引入了一定的双折射量级,如图 7(d)所示,使得光子在空间和偏振构成的合成维度中实现了复杂的三维量子行走,为在复杂图态上进行量子动力学实验探索开辟了新途径。

光量子算法芯片是为了在片上实现特定问题的求解而设计并制备的芯片。基于飞秒激光直写所具有的三维直写能力, Crespi 等^[100]利用多个双模分束器组成的三维集成 4 模和 8 模多臂干涉仪实现了片上量子快速傅里叶变换 (qFFT), 干涉仪的基本结构如图 7(e)

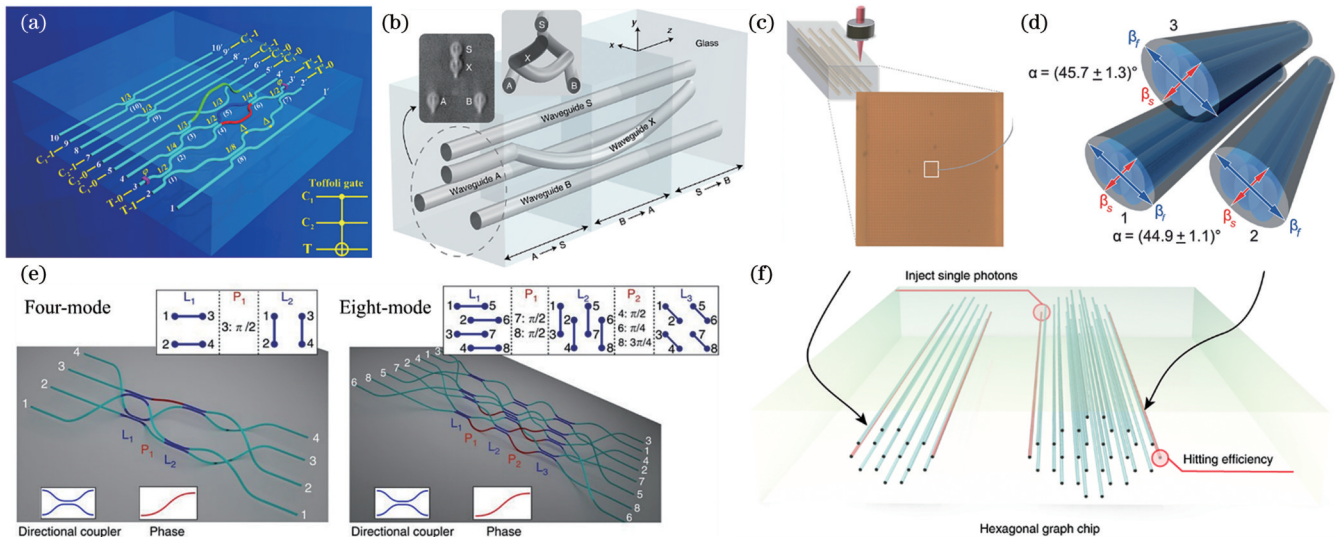


图 7 飞秒激光直写的三维光量子芯片。(a)首个三比特 Toffoli 量子逻辑门^[96]; (b)实现双光子编织的三维波导阵列^[6]; (c)2401 根波导组成的用于二维量子行走的阵列^[98]; (d)引入双折射的三波导耦合系统^[99]; (e)用于演示 qFFT 的 4 模和 8 模集成干涉仪的结构示意图^[100]; (f) 六方黏合树示意图^[101]

Fig. 7 Three-dimensional quantum photonic chips fabricated by FsLDW technique. (a) Schematic of the first three qubit quantum Toffoli gate^[96]; (b) three-dimensional waveguide array for the two-mode braiding^[6]; (c) the array with 2401 waveguides for two-dimensional quantum walks^[98]; (d) three-waveguide coupled system introducing the birefringence^[99]; (e) schematics for four-mode and eight-mode integrated interferometers for the implementation of qFFT^[100]; (f) schematic of a glued hexagonal tree^[101]

所示。借助飞秒激光直写技术灵活的三维直写能力,该器件在传播方向上存在 H 门端口的变换,并且在红色臂处引入了特定的相位差。Crespi 等利用这类干涉仪实现了对大量 qFFT 特定输出组合的抑制规律的实验观察,结果表明注入的光子之间存在真正的量子干涉,从而为光子平台的诊断提供了强大工具。2018 年, Tang 等^[101]提出了一种三维的六方黏合树结构,如图 7(f)所示,该结构使层数增加时节点数呈多项式而非传统的指数增长,芯片中的层数最大可达到 8 层,节点数达到了 160。在单光子输入的情况下,他们以两层为例展示了量子算法可实现约 90% 的最优到达效率,并发现最佳的到达时间与黏合树层数之间呈线性关系。该实验开辟了一条通往量子加速的可扩展路径,解决了经典的难以解决的复杂问题。

3.3 拓扑光子学

近年来,受凝聚态物理的启发,人们将拓扑自由度和拓扑能带理论引入光学,开创了一种新的研究领域——拓扑光子学,其为实现具有拓扑保护、抵抗扰动的光波输运提供了新的手段^[102-103],有望从基础物理层面解决大规模光子集成过程中串扰、弯曲、缺陷散射等因素造成的影响。特别地,由于能在演化方向上对三维路径以及有效折射率进行灵活调控,基于飞秒激光直写技术制备的光波导阵列提供了一种相对简单的方式来展示光子拓扑态。此外,在波导中引入光学损耗或者非线性效应可以提供额外的自由度,从而有效控制拓扑态的产生,有望为系统提供更加丰富的拓扑物理。因此,基于飞秒激光直写技术制备的波导阵列已成为拓扑光子学的重要研究体系之一,已被广泛用于厄米和非厄米拓扑模型的理论 and 实验工作中。

2013 年, Rechtsman 等^[7]在熔融石英中利用蜂窝形螺旋波导阵列构建了光波段的拓扑绝缘体,并通过实验证明了在没有外部场的情况下也可以实现无散射的单向边缘状态的观测,如图 8(a)所示。由于光在波导内的传输满足傍轴近似方程,并且该方程在数学上等效于薛定谔方程,因此光的传播方向可类比于时间维度。沿传播方向引入螺旋波导的结构可以类比于施加了时间调制的周期性驱动(Floquet)系统,等效于引入了人工规范场,有效地打破了时间反演对称性。此时,在图 8(b)所示的 Floquet 能带中出现了一个带隙,光子晶格变成 Floquet 拓扑绝缘体,从而在波导阵列边缘处形成了拓扑保护的边界态。在这一工作的启发下,很多研究人员开始尝试在多种不同的光学体系中实现拓扑光的保护传输,极大地推动了低耗散光子器件的发展。

2015 年, Zeuner 等^[104]通过使波导的几何形状在空间上呈正弦振荡来诱导弯曲损耗,从而设计出了图 8(e)所示的一维非厄米 SSH 模型,并首次直接从体态上对非厄米系统中的拓扑相变进行了实验观测。对于

SSH 波导阵列,通过调节波导之间的距离,可以实现平凡拓扑相向非平凡拓扑相的转变。根据体边对应关系,非平凡拓扑相能够支持边界态,是实验中观测拓扑的最重要途径。在此工作中, Zeuner 等发现在任何波导间距离差 $\Delta d = (d_1 - d_2)/2$ 下的光子平均位移 $\langle \Delta m \rangle$ 都是拓扑量子化的,因此不需要依赖边界,能够直接从体态上观测拓扑特性。如图 8(f)所示,当阵列中心单元中的 A 波导被激发时,可以观察到从 $\langle \Delta m \rangle \approx 0$ 到 $\langle \Delta m \rangle \approx 1$ 的明显跃迁。这表明距离差 $\Delta d = 0$ 附近发生了拓扑相变。

近期, Alexander 课题组^[105]利用如图 8(g)所示的三维光波导单元构造了反常 Floquet 波导阵列,并且发现非线性可以驱动拓扑相变,从而引发非线性手性边界态,如图 8(h)所示带隙中出现的红色实线。如图 8(i)所示:当体系中通入线性光时,晶格结构是拓扑平庸的,不存在拓扑边界态,表现出边缘激发的体衍射行为;当体系中通入高功率测试光时,波导受到强的非线性光作用,折射率发生改变,系统变为非平庸的拓扑绝缘体并产生沿边缘单向传输的拓扑边界态。与传统线性拓扑结构不同,非线性拓扑绝缘体的出现与消失可以通过调节激发光的强度来实现,具有可重构性,从而为拓扑可重构器件的设计提供了实现途径。

3.4 天文光子学

天文光子学大约出现在 2001 年,属于光子学与天文学的交叉学科,旨在将光子技术应用到天文学仪器中^[106]。基于波导的集成光子器件更紧凑且对环境不敏感,能在降低仪器成本、尺寸、重量和复杂性的同时提高其性能。借助飞秒激光直写技术灵活的三维加工能力,人们已经演示了片上光子灯笼、光束组合器等器件。

光子灯笼是一种连接多模(MM)系统与多个单模(SM)系统的低损耗波导器件。为了解决望远镜端收集星光的多模光纤与分析端滤波所用单模布拉格光栅之间的对接问题,人们利用光子灯笼将光束从多模光纤转移到平行排列的多根单模光纤中。2011 年, Thomson 等^[107]展示了飞秒激光直写的集成光子灯笼。该灯笼支持 16 个模式输入,但多模-单模转换和多模-单模-单模转换的插入损耗分别为 2 dB 和 5.7 dB,无法实现实用化。因此, Withford 课题组^[108]对光子灯笼的多模波导进行了优化,选择最优的圆形波导阵列构成的多模波导,随后对多模光纤到单模光纤的过渡波导长度进行优化,最终在焦比(F/D , F 为望远镜焦距, D 为直径)大于 12 时得到了 97% 的最佳吞吐量^[109]。2014 年, Spaleniak 等^[110]在三维光子灯笼的单模出射端首次集成了波导布拉格光栅,如图 9(a)所示,其在实现特定波长的滤光后又重新转为多模输出。这一设计为滤波和转化器件的集成提供了参考。另外,利用飞秒激光的三维直写能力,可以将光子灯笼的出射

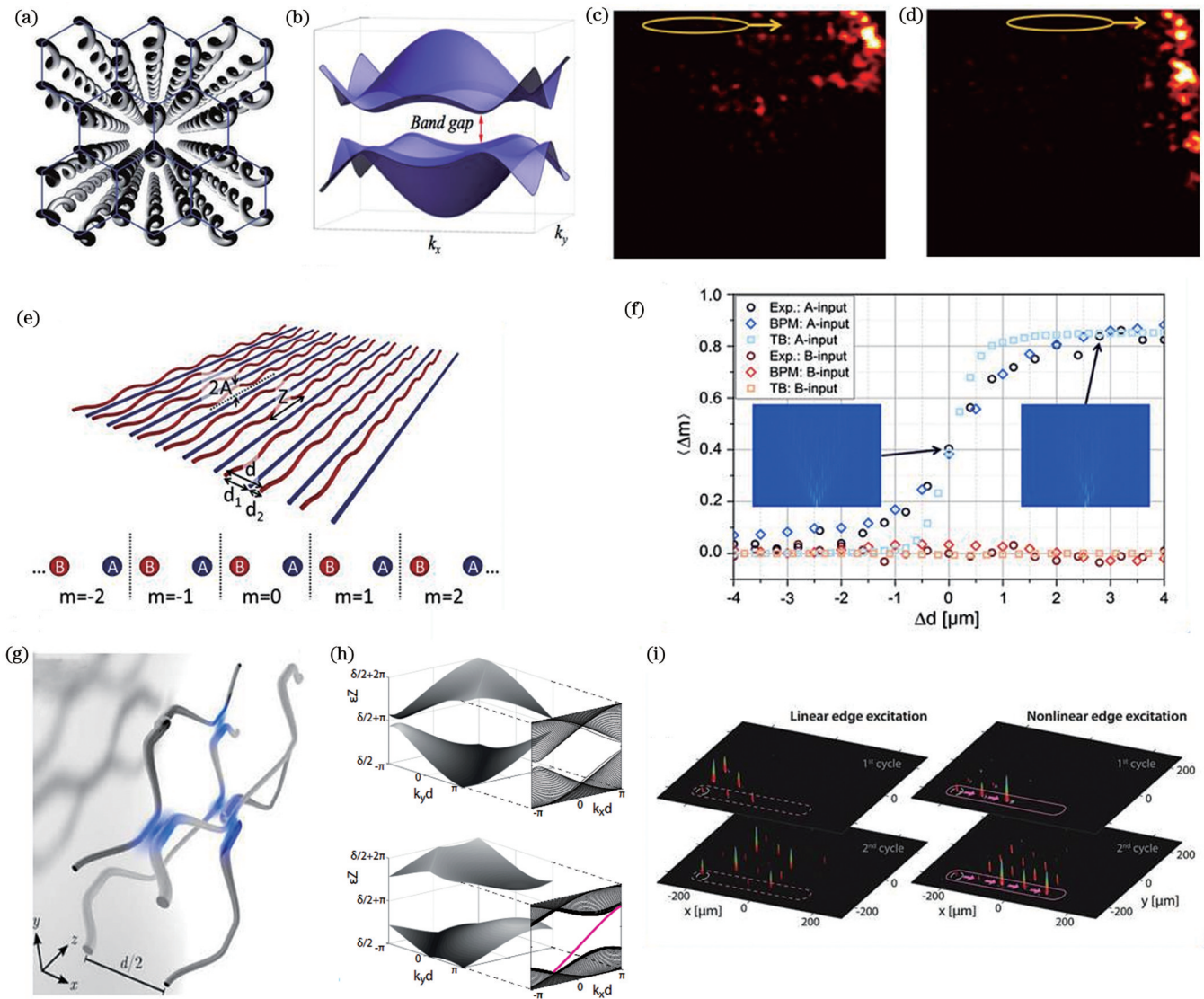


图 8 光波导阵列中的拓扑相。(a)螺旋诱导的Floquet拓扑绝缘体^[7];(b) Floquet拓扑绝缘体的体带结构^[7];(c)(d)不同传播距离下波导阵列输出面上的光场分布^[7];(e)一维非厄米SSH模型^[104];(f)不同波导间距离 Δd 下光子平均位移 $\langle \Delta m \rangle$ 的实验和模拟结果^[104];(g)非线性诱导光子反常Floquet拓扑绝缘体^[105];(h)反常Floquet拓扑绝缘体的体带结构^[105];(i)线性和非线性边缘激发条件下反常Floquet阵列中的光衍射^[105]

Fig. 8 Topological phase in optical waveguide arrays. (a) Spiral induced Floquet topological insulator^[7]; (b) bulk band structure of Floquet topological insulators^[7]; (c) (d) optical field distributions on the output surface of the waveguide array at different propagation distances^[7]; (e) one-dimensional non-Hermitian SSH model^[104]; (f) experimental and simulation results of mean displacement $\langle \Delta m \rangle$ for different distance differences Δd between waveguides^[104]; (g) nonlinear induced photon anomalous Floquet topological insulator^[105]; (h) bulk band structure of anomalous Floquet topological insulators^[105]; (i) light diffraction in the anomalous Floquet arrays under linear and nonlinear edge excitation regimes^[105]

端排列成一条直线,构造人工“狭缝”。狭缝的长宽比越大,越有利于减小望远镜和光谱仪的尺寸,从而降低天文仪器的成本。基于构建人工狭缝的要求,Harris等^[8]设计出了图9(b)所示的三维“光子礼帽”器件。入射的多模波导首先绝热转换为二维单模波导阵列,随后再重新排列成一维阵列,进一步缩小间距后输出。未来,通过进一步优化激光直写波导的性能,如损耗、弯曲半径等,可以加速光子灯笼的实用化。

光束合束器是一种可以将来自多个望远镜或单个

望远镜的多个子孔径的光合束并产生相应干涉信号的光子器件。随着参与干涉的光束增加,合束的端口组合也随之增加,利用二维波导合束器将会不可避免地引入波导交叉,从而导致信号串扰。因此,三维光波导合束器的研制十分有必要。2017年,Minardi课题组^[111]设计并制备了三维光束合束器,其允许组合2台和4台望远镜的光并且不存在波导交叉。经过校准后,该三维光束合束器可以精确地获得成对的单色和中红外激发光束的可见度和相位。2021年,Martinod等^[112]利用飞秒激光直写技术制备了三维光瞳重排器

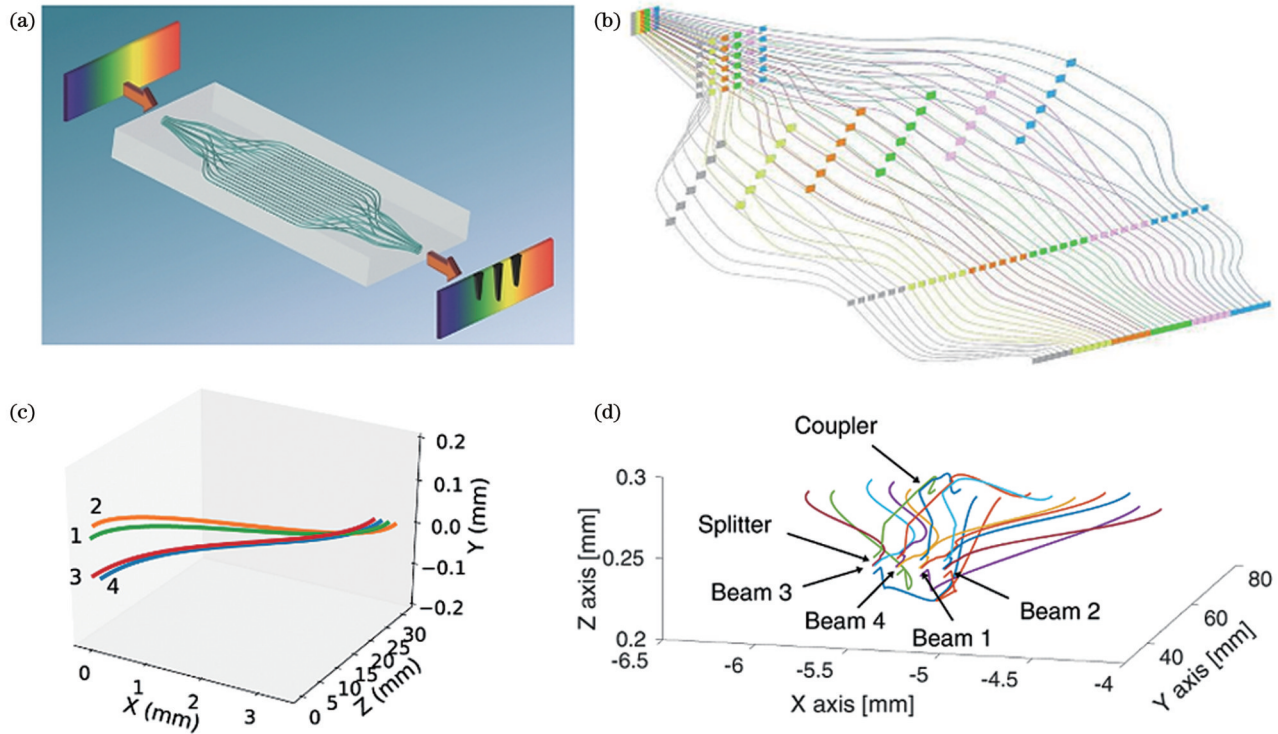


图9 用于天文光子学的三维光波导器件。(a)集成布拉格光栅的光子灯笼示意图^[110];(b)光子礼帽示意图^[8];(c)入瞳重排器示意图^[111];(d)三维光束合束器示意图^[112]

Fig. 9 Three-dimensional optical waveguide devices for astrophotonics. (a) Schematic of the PL with Bragg gratings^[110]; (b) schematic of the photonic dicer^[8]; (c) schematic of the pupil remapper^[111]; (d) schematic of three-dimensional beam combiner^[112]

及光束合束器,如图9(c)、(d)所示。光瞳重排器将4个二维排列的子孔径中的光排列到一维输出并保持相同的相位,而光束合束器将4个孔径的星光进行不同端口间的干涉,随后输入到光谱仪中。测试发现,在模拟的大气湍流条件下,所有基线的消光深度小于 10^{-3} 且精度为 10^{-4} 。在实际观测中,该仪器实现了对恒星角直径的测量,且角直径仅为望远镜衍射极限的28%。这一应用展示了飞秒激光直写技术制备的三维光子器件在体积、性能上相较于体光学器件的优越性。

3.5 光学传感

近年来,光纤在传感领域的应用引起了广泛关注。基于倏逝波与外部介质作用的光学传感器具有原位、快速、远程、实时、无损以及可选择性的优点,已被应用于气体检测^[113]、化学检测^[114]及折射率传感^[115-116]等方面。然而,制备这种传感器的光纤必须是锥形的^[115]或者其包层的一部分必须可被移除^[115],以便使倏逝波与传感介质接触。利用飞秒激光直写,可以在材料近表面写入波导,从而在无须破坏体材料的条件下制备集成化的波导传感器。

体材料内直写的波导传感器具有小型紧凑、稳定性好的优点。2010年,Osellame课题组^[117]在熔融石英内将马赫-曾德尔干涉仪(MZI)与微流控通道集成在一起,构成一个光流控芯片,如图10(a)所示。通过检测透过光的相位差,可以对流过微流控通道的液体实现无标记折射率(RI)传感,检测极限可降低至

10^{-4} RIU。2019年,Khalil等^[118]首次在掺银玻璃中制备了三维波导折射率传感器,如图10(b)所示,其近表面部分为传感区域。在这种玻璃中,飞秒激光在焦点处诱导银团簇,发生特殊的“A型”(Type A)修饰,从而成功地在采用任何补偿方法的条件下,在表面以下 $1\ \mu\text{m}$ 处制备了波导。当在近表面波导上滴加折射率由1.602变化到1.604的折射率油时,波导输出功率显著降低,传感器展现出了可媲美光纤传感器的高灵敏度以及以前从未报道过的双翼特性,如图10(c)所示。

除了在体材料内制备波导传感结构外,利用飞秒激光直写技术也可以在光纤包层中写入三维传感器。光纤中写入的三维波导传感器独立、灵活、轻便,有利于在实际场景中应用。光纤中的波导传感器主要基于MZI^[119-121]和波导布拉格光栅^[9,122]。Zhao等^[121]提出并演示了一种基于法布里-珀罗干涉仪(FPI)和MZI串联的光纤传感器,如图10(d)所示。通过在单模光纤之间拼接一个具有U形缺陷槽的中空芯光纤(HCF)来形成FPI,而MZI则由光纤纤芯和激光写入的包层波导组成。由于写入波导靠近包层-涂覆层界面,波导的消逝场与涂覆层之间存在相互作用。部分入射光被HCF反射后形成FPI光谱,而纤芯中传播的透射光被耦合到写入波导并沿包层区域传输,最终返回纤芯出射形成MZI光谱。实验结果表明该传感器具有 $0.244\ \text{nm}/\%$ 的盐度灵敏度和 $-2.767\ \text{nm}/\text{C}$ 的温度灵敏度,有望应用于海水参数的检测中。2021年,Wang

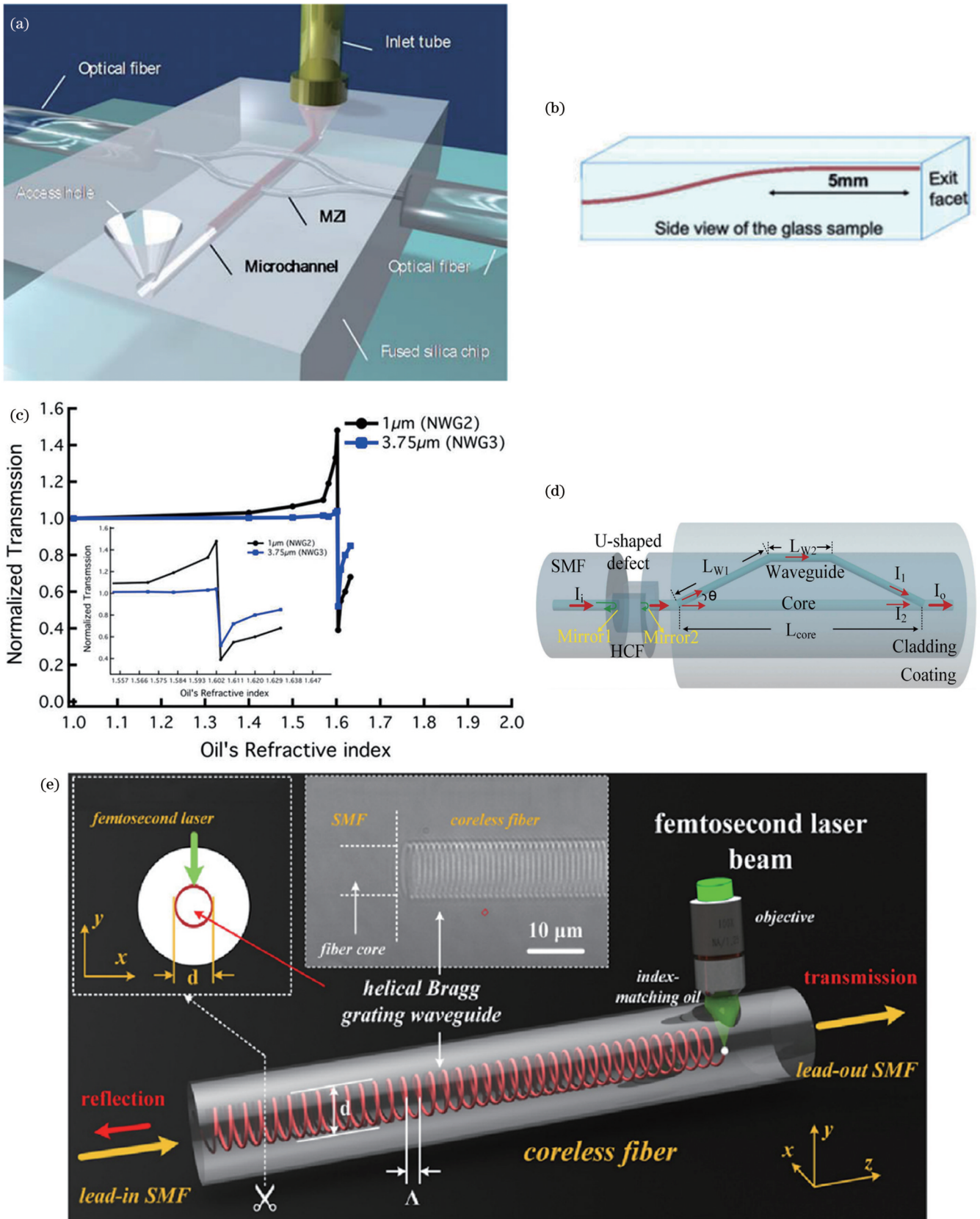


图 10 三维波导传感器。(a) 飞秒激光直写微流控通道和集成 MZI 示意图^[117]；(b)(c) 掺银玻璃中的折射率传感器及其在不同折射率油下的透过曲线^[118]；(d) FPI 和 MZI 级联的传感结构示意图^[121]；(e) 无芯光纤中螺旋布拉格光栅波导示意图^[122]

Fig. 10 Three-dimensional waveguide sensors. (a) Schematic of the femtosecond-laser-fabricated microfluidic channel and integrated MZI^[117]; (b)(c) schematic of the RI sensor in silver containing glasses and transmission curves of the sensor under different refractive index oils^[118]; (d) schematic of the cascaded FPI and MZI sensing structure^[121]; (e) schematic of an HBGW created in coreless fiber^[122]

课题组^[122]利用飞秒激光直写技术在多模无芯光纤中制备了单模螺旋布拉格光栅波导(HBGW),其中螺旋结构为凹陷包层,体材料为导光区域,如图 10(e)所示。周期性螺旋结构使单模 HBGW 内产生强烈的布拉格共振,测得 HBGW 的温度灵敏度和应变灵敏度分别为 11.65 pm/°C 和 1.29 pm/ $\mu\epsilon$ ^[122],有望用于压力和温度双重传感。

4 三维光波导面临的挑战

三维光波导在诸多领域都展现出了强大的功能,然而,其在波导损耗、截面控制、直写纵深以及器件调控等方面还面临一些技术问题。

4.1 低损耗波导的制备

光波导的损耗决定了飞秒激光直写光子回路的集成度。因此,采用不同的加工参数和加工方法在不同介质内获得低损耗光波导的研究一直备受国内外研究

人员关注。

对于熔融石英,人们通常采用低重复频率飞秒激光低速直写的方式实现低损耗波导的加工。2022年,Tan等^[123]通过对单根波导进行多次扫描,在熔融石英内实现了 0.07 dB/cm 的传输损耗。对于一些多组分玻璃(如硅酸盐玻璃^[124-125]、铅锗玻璃^[126]、硼酸铋玻璃^[127]和硫系玻璃^[128]等)来说,采用高的重复频率和扫描速度可以在材料内实现热积累效应,从而直写出端面对称、低损耗的波导。Eaton等^[124]利用 1 MHz 飞秒激光在 BK7 玻璃内直写出了传输损耗为 0.3 dB/cm 的单模 1550 nm 波导。对于晶体类材料,通常利用低重复频率飞秒激光进行 Type II 型折射率改性,以获得低损耗的凹陷薄包层波导。2017年,Chen 课题组^[129]在 β -BBO 晶体内制备了传输损耗为 0.19 dB/cm 的单模凹陷薄包层波导。表 1 详细列举了利用飞秒激光在各介质内直写低损耗波导的一些工作。

表 1 飞秒激光直写的不同介质内的低损耗波导

Table 1 Low-loss waveguides in various substrates fabricated by FsLDW technology

Substrate	Repetition rate /kHz	Scanning velocity /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Guiding wavelength /nm	Propagation loss /($\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Ref.
Fused silica	500	0.125	1550	0.07	[123]
Eagle XG	500	1	1550	0.26	[125]
BK7	1000	1.5	1550	0.3	[124]
Lead-germanate glass	5000	0.5	1550	0.2	[126]
BZH7	250	0.2	1550	0.2	[127]
Chalcogenide glass	600	1	1550	0.15	[128]
Nd:YVO ₄	1	0.5	1064	0.46	[130]
Diamond	1	0.1	633	1.2	[131]
Z-LiNbO ₃	1	10	1550	0.4	[132]
β -BBO	1	0.5	800	0.19	[129]
Pr:YLF	1	0.05	444	0.12	[133]
YAG:Nd	1	0.5	1064	0.15	[134]
PMMA	100	36	850	0.5	[135]

4.2 截面形状控制

波导的截面形状控制对于其模场形状、有效折射率^[136]以及双折射^[137]的控制至关重要。然而,当飞秒激光脉冲紧聚焦于透明介质中时,由于浸没介质(如空气)与样品本身的折射率不匹配,产生了球面像差,从而使得焦点拉长变形,如图 11(a)所示^[138]。另外,飞秒激光光强超过一定阈值时就会激发材料的克尔非线性,从而引入非永久折射率改变区域并形成二次聚焦^[139]。这两个因素将会扰乱激光光强分布,导致波导截面呈狭长的水滴状,进而导致波导与光纤的对接耦合损耗增加。此外,非对称截面将给波导引入额外的波导形状双折射,导致偏振态无法在波导内稳定

传输^[137]。

通过改变扫描策略可以改善波导的对称性。采用纵向直写的方式可以获得截面对称的波导,但直写的波导长度会受到物镜工作距离的限制^[140]。除了单次扫描外,还可以采用低数值孔径(NA)物镜以及横向平行多次扫描的方式,每次扫描间隔约为 1 μm 。多根平行轨迹相互重叠便构成了矩形截面^[141],而且多次扫描波导在 C 波段的模式和耦合损耗与单次扫描波导相比实现了 50% 的减小^[142]。此外,利用柱透镜组^[143]或狭缝^[144-145]能在垂直于条形光束方向上降低有效数值孔径,从而降低对球面像差的敏感性。Ferrer 等^[145]采用图 11(b)所示的狭缝整形光路成功地在熔融石英表面

以下 7 mm 处制备了圆形波导。Yu 等^[146]利用柱透镜和狭缝组合光路成功地制备了图 11(c) 所示的截面圆形度为 97.6% 的圆形光波导,其双折射量级低至 1.49×10^{-6} ,有望被应用于制备偏振无依赖光子回路。需要说明的是,上述方法仅减轻了球面像差和克尔自聚焦的影响,而通过在 SLM 或变形镜(DM)^[147-149]上加载带有像差的共轭相位图案也可以完全补偿球面像差和克尔自聚焦的影响,如图 11(d) 所示。经过补偿后在材料内制备的同种结构与无补偿时相比有了明显改善^[148]。2021 年, Li 等^[150]利用 SLM 将单焦点飞秒脉冲调制为多焦点脉冲,如图 11(e) 所示。Li 等通过控制子焦点的

排列和间距,采用焦点阵列在 Corning Eagle2000 内构建出了球形热场,并直写出了圆形度为 96.0% 的光波导,展示了多焦点飞秒脉冲直写的波导在不同空间方向上的耦合一致性,有利于三维耦合器件的制备。

基于上述方法,任意截面的光波导可得以实现。Li 等^[80]对多个圆形波导进行不同排列的拼接组合,演示了不同截面形状的组合波导,并实现了波导传播常数的控制以及多模模式的传输。Sun 等^[151]利用 SLM 调制出均匀的长条形光束并用该光束进行多次扫描,实现了不同截面形状波导的变换,并演示了片上波片、偏振旋转器以及模式转换器。

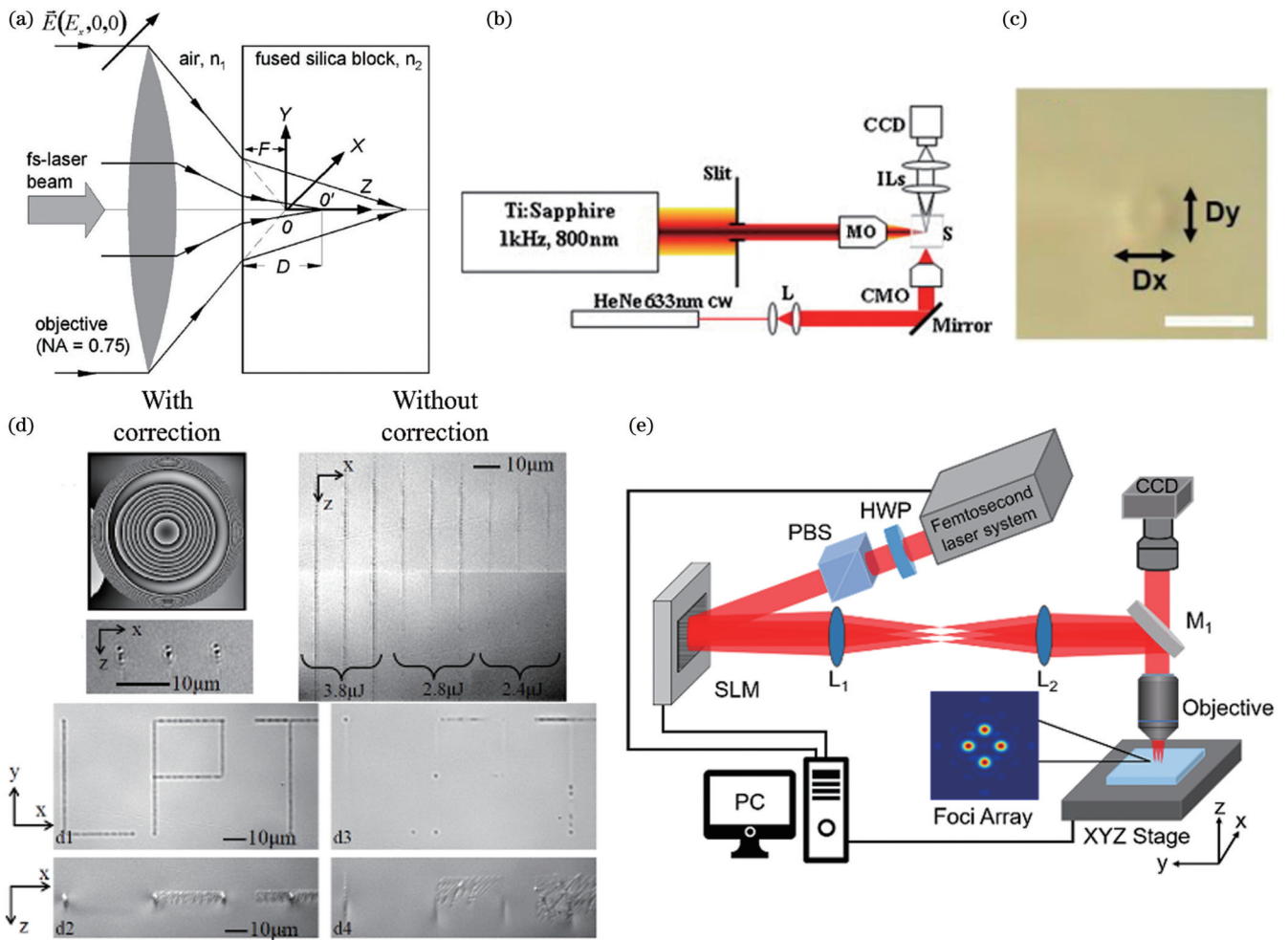


图 11 球面像差及其补偿技术。(a)球面像差的引入^[138]; (b)狭缝整形光路示意图^[145]; (c)柱透镜-狭缝组合光路直写的圆形截面光波导,比例尺为 $10 \mu\text{m}$ ^[146]; (d)SLM 补偿算法实现大深度结构直写^[148]; (e)多焦点飞秒脉冲直写光路示意图^[150]

Fig. 11 Spherical aberration and its compensation techniques. (a) Introduction of spherical aberration^[138]; (b) schematic of the slit shaping optical path^[145]; (c) optical microscopy photo of the circular cross-section optical waveguide written by the cylindrical lens and slit combination optical path and the scale bar is $10 \mu\text{m}$ ^[146]; (d) deep structures direct writing with the aid of SLM compensation algorithm^[148]; (e) schematic of the multi-foci-shaped femtosecond laser direct writing optical path^[150]

4.3 大纵深直写

激光直写波导的纵深决定了其三维光子回路的空间集成度。然而,球面像差不仅会导致激光的实际聚焦深度比目标聚焦深度大,还会使材料的改性阈值随着直写纵深的增大而增大,严重限制了飞秒激光直写大规模三维光子回路的能力^[138]。

目前,大纵深波导结构的激光直写主要是基于 SLM 校正像差实现的。在采用 SLM 补偿不同深度下球面像差的基础上, Huang 等^[152]在加工中引入了一种离子体发射感应方法,该方法对加载在 SLM 上的相位图案进行实时调整,以获得最佳焦点。他们采用该策略成功地在 1 mm 深度范围内制备了高度

对称的光波导,如图 12(a)所示。同年,Feng 等^[153]结合功率补偿和 SLM 像差补偿方法,制备了由 5000 根波导组成的大规模光波导阵列,如图 12(b)所示,这种波导的均一度较好。通过将“h”结构用三维弯曲波导阵列包围起来,实现了对阵列中间结构的隐身。实现大纵深直写,除了可以采用 SLM 补偿像差外,

还有其他策略。如,孙洪波团队基于多束多光子脉冲时空同步,自主研发出了一套大纵深三维光子芯片“光刻机”,并采用该“光刻机”制备了由 12100 根性质均一波导组成的大规模阵列,其纵深跨度可达 1.1 mm,为高性能大纵深三维光子芯片的制备奠定了基础^[13]。

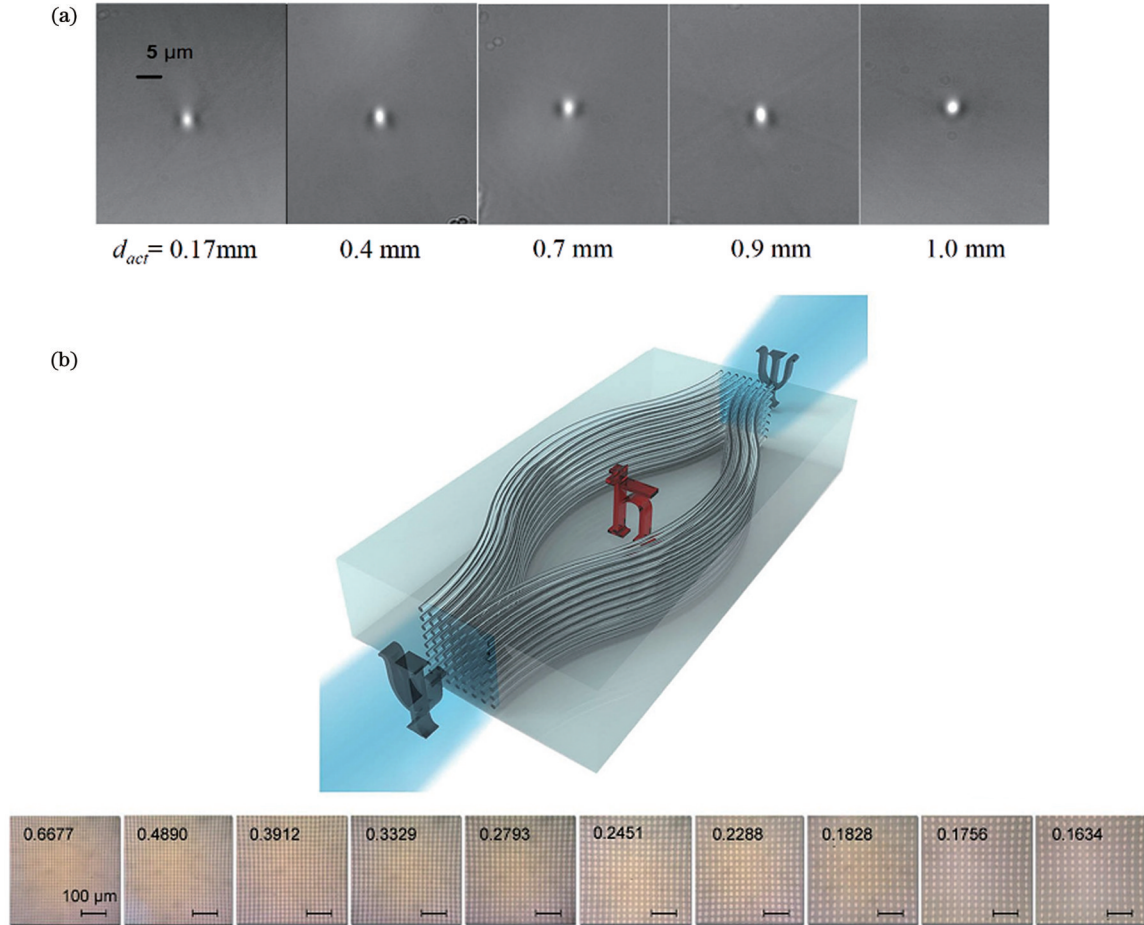


图 12 SLM 补偿像差实现大纵深波导直写。(a)不同深度下直写的对称波导截面^[152]; (b)大规模均一波导阵列实现结构隐身^[153]
Fig. 12 Direct writing of large-depth waveguides by compensating the spherical aberration by SLM. (a) Symmetric cross-sections of waveguides written under different depths^[152]; (b) large-scale uniform waveguide array for achieving structural invisibility^[153]

4.4 三维回路的动态调控

集成光子芯片的动态操作和重构通常通过外部可控的相位元件实现^[4]。到目前为止,已经出现了在飞秒激光直写波导电路中利用电光效应^[154]、弹性光效应^[155]或热光效应^[156]来实现主动相位控制的相关报道。然而,与广泛利用热相移技术的二维光子芯片平台相比,基于飞秒激光直写的三维光子芯片在厚基板内,远离表面的金属电极,使得热光相移器的效率降低且增加了相邻器件之间的串扰,难以实现三维光子回路的任意可调。

2015年,Chaboyer 等^[157]利用 tritter 制备了第一个可调谐的三臂干涉仪。如图 13(a)所示,基于飞秒激光的三维直写能力,将三臂干涉仪的中间臂设计成高架波导(接近表面电极),在增大电极调制效率的同时也能实现特定波导的相位延迟。2020年,Ceccarelli

等^[158]利用飞秒激光在 Corning EagleXG 中直写了 MZI 并进行了通道改性,之后再经过腐蚀构造了悬臂梁结构,如图 13(b)所示。这种悬臂梁结构将热相移器周围的热量限制在波导周围,使功率消耗和热串扰显著降低了几个数量级,为紧凑和高效的可调三维光波导器件提供了实现途径。

此外,与传统的平面光子芯片制备方法(如二维光刻)相比,三维光子芯片的制备仍然面临一些挑战,包括专用的直写设备不足、缺乏统一的标准工艺,以及缺乏对大规模三维扩展光芯片性能进行检验的标准化方法。这些因素导致波导的设计和制备存在不确定性,从而对其商业化应用造成了一定阻碍。通过开发可靠的直写设备以及对制备工艺和检测工艺进行优化,将进一步推动三维光子芯片的实用化进程。

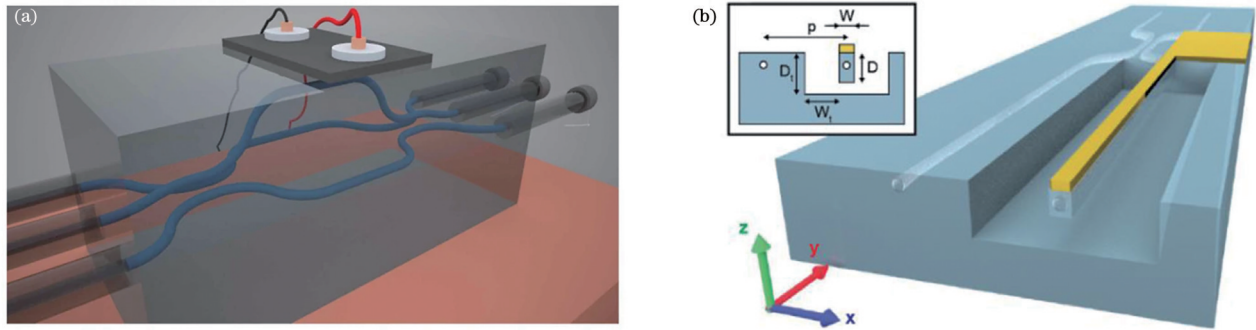


图 13 三维可调谐光波导。(a)深度变化的高架波导结构^[157]; (b)悬臂梁波导结构^[158]

Fig. 13 Three-dimensional reconfigurable optical waveguides. (a) Depth-varying overpass waveguides^[157]; (b) waveguide in a cantilever beam^[158]

5 结 论

经过近 25 年的研究,飞秒激光直写已经被证实是一种能在各种介质内制备波导的有效方法。通过调整和优化直写参数(如能量、脉冲持续时间、重复频率、波长、偏振、焦距和扫描速度等),可以在各种衬底内制备波导,而且无须更改加工步骤。这一特点与真三维加工能力、快速成形能力相结合,使得飞秒激光直写成为理想的制备三维光波导器件的手段。目前,采用不同三维设计的光波导器件凭借其独特的优势已经在光通信、集成量子光学、拓扑光子学、天文光子学以及光学传感等领域得到了广泛应用。为了推动三维光子回路的实用化,必须要解决加工、检测以及调控等方面面临的挑战,实现低损耗、截面任意可控、大纵深波导的制备以及三维器件的高效调制。未来,三维光子芯片将是人们关注的重点,而飞秒激光直写将是制备此类光子芯片的首选方法。

参 考 文 献

- [1] Mizuno T, Miyamoto Y. High-capacity dense space division multiplexing transmission[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 35: 108-117.
- [2] Bao J M, Fu Z R, Pramanik T, et al. Very-large-scale integrated quantum graph photonics[J]. Nature Photonics, 2023, 17(7): 573-581.
- [3] Liu J Q, Huang G H, Wang R N, et al. High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits[C]//2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 21-25, 2021, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2021.
- [4] Bogaerts W, Pérez D, Capmany J, et al. Programmable photonic circuits[J]. Nature, 2020, 586(7828): 207-216.
- [5] Wang J, Cai C K, Cui F, et al. Tailoring light on three-dimensional photonic chips: a platform for versatile OAM mode optical interconnects[J]. Advanced Photonics, 2023, 5(3): 036004.
- [6] Zhang X L, Yu F, Chen Z G, et al. Non-Abelian braiding on photonic chips[J]. Nature Photonics, 2022, 16(5): 390-395.
- [7] Rechtsman M C, Zeuner J M, Plotnik Y, et al. Photonic floquet topological insulators[J]. Nature, 2013, 496(7444): 196-200.
- [8] Harris R J, MacLachlan D G, Choudhury D, et al. Photonic spatial reformatting of stellar light for diffraction-limited spectroscopy[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 450(1): 428-434.
- [9] Waltermann C, Doering A, Köhring M, et al. Cladding waveguide gratings in standard single-mode fiber for 3D shape sensing[J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 3109-3112.
- [10] Davis K M, Miura K, Sugimoto N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. Optics Letters, 1996, 21(21): 1729-1731.
- [11] Eaton S M, Ng M L, Osellame R, et al. High refractive index contrast in fused silica waveguides by tightly focused, high-repetition rate femtosecond laser[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2011, 357(11/12/13): 2387-2391.
- [12] Eaton S M, Chen W J, Zhang H B, et al. Spectral loss characterization of femtosecond laser written waveguides in glass with application to demultiplexing of 1300 and 1550 nm wavelengths[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(9): 1079-1085.
- [13] 祝世宁. 飞秒激光直写非阿贝尔三维光子芯片[J]. 科学通报, 2022, 67(34): 4041-4043.
- [13] Zhu S N. Non-Abelian 3D photonic chips fabricated by femtosecond-laser direct-writing[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(34): 4041-4043.
- [14] Li L Q, Nie W J, Li Z Q, et al. All-laser-micromachining of ridge waveguides in LiNbO₃ crystal for mid-infrared band applications[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 7034.
- [15] Bérubé J P, Vallée R. Femtosecond laser direct inscription of surface skimming waveguides in bulk glass[J]. Optics Letters, 2016, 41(13): 3074-3077.
- [16] Marshall G D, Politi A, Matthews J C F, et al. Laser written waveguide photonic quantum circuits[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 12546-12554.
- [17] Keldysh L V. Ionization in the field of a strong electromagnetic wave[J]. Soviet Physics-JETP, 1965, 20(5): 1307-1314.
- [18] Lenzner M, Krüger J, Sartania S, et al. Femtosecond optical breakdown in dielectrics[J]. Physical Review Letters, 1998, 80(18): 4076-4079.
- [19] Schaffer C B, Brodeur A, Mazur E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(11): 1784-1794.
- [20] Gross S, Dubov M, Withford M J. On the use of the Type I and II scheme for classifying ultrafast laser direct-write photonics[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7767-7770.
- [21] Glezer E N, Mazur E. Ultrafast-laser driven micro-explosions in transparent materials[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(7): 882-884.
- [22] Juodkakis S, Nishimura K, Tanaka S, et al. Laser-induced microexplosion confined in the bulk of a sapphire crystal: evidence of multimegabar pressures[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(16): 166101.
- [23] Watanabe W, Sowa S, Tamaki T, et al. Three-dimensional

- waveguides fabricated in poly (methyl methacrylate) by a femtosecond laser[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(8L): L765.
- [24] Miura K, Qiu J R, Inouye H, et al. Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(23): 3329-3331.
- [25] Chen G Y, Piantadosi F, Otten D, et al. Femtosecond-laser-written microstructured waveguides in BK7 glass[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 10377.
- [26] Ferrer A, de la Cruz A R, Puerto D, et al. *In situ* assessment and minimization of nonlinear propagation effects for femtosecond-laser waveguide writing in dielectrics[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(8): 1688-1692.
- [27] Osellame R, Maselli V, Chiodo N, et al. Fabrication of 3D photonic devices at 1.55 μm wavelength by femtosecond Ti:sapphire oscillator[J]. Electronics Letters, 2005, 41(6): 315-317.
- [28] Streltsov A M, Borrelli N F. Fabrication and analysis of a directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses[J]. Optics Letters, 2001, 26(1): 42-43.
- [29] Eaton S M, Zhang H B, Herman P R, et al. Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate[J]. Optics Express, 2005, 13(12): 4708-4716.
- [30] Zhang Y Y, Wu J M, Wang L, et al. Femtosecond laser direct writing of Nd:YAG waveguide with Type I modification: positive refractive index change in track[J]. Optical Materials, 2021, 113: 110844.
- [31] He R Y, Hernández-Palmero I, Romero C, et al. Three-dimensional dielectric crystalline waveguide beam splitters in mid-infrared band by direct femtosecond laser writing[J]. Optics Express, 2014, 22(25): 31293-31298.
- [32] Wu B, Zhang B, Liu W J, et al. Recoverable and rewritable waveguide beam splitters fabricated by tailored femtosecond laser writing of lithium tantalate crystal[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 145: 107500.
- [33] Burghoff J, Nolte S, Tünnermann A. Origins of waveguiding in femtosecond laser-structured LiNbO_3 [J]. Applied Physics A, 2007, 89(1): 127-132.
- [34] Zhang B, Xiong B C, Li Z Q, et al. Mode tailoring of laser written waveguides in LiNbO_3 crystals by multi-scan of femtosecond laser pulses[J]. Optical Materials, 2018, 86: 571-575.
- [35] Feng T, Sahoo P K, Arteaga-Sierra F R, et al. Pulse-propagation modeling and experiment for femtosecond-laser writing of waveguide in Nd:YAG[J]. Crystals, 2019, 9(8): 434.
- [36] Liu H L, Jia Y C, Chen F, et al. Continuous wave laser operation in Nd:GGG depressed tubular cladding waveguides produced by inscription of femtosecond laser pulses[J]. Optical Materials Express, 2013, 3(2): 278-283.
- [37] He R Y, An Q, de Aldana J R V, et al. Femtosecond-laser micromachined optical waveguides in $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ crystals[J]. Applied Optics, 2013, 52(16): 3713-3718.
- [38] Salamu G, Pavel N. Power scaling from buried depressed-cladding waveguides realized in Nd:YVO₄ by femtosecond-laser beam writing[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 84: 149-154.
- [39] Zhang Q, Li M, Xu J, et al. Reconfigurable directional coupler in lithium niobate crystal fabricated by three-dimensional femtosecond laser focal field engineering[J]. Photonics Research, 2019, 7(5): 503-507.
- [40] Bérubé J P, Lapointe J, Dupont A, et al. Femtosecond laser inscription of depressed cladding single-mode mid-infrared waveguides in sapphire[J]. Optics Letters, 2018, 44(1): 37-40.
- [41] Nie W J, Cheng C, Jia Y C, et al. Dual-wavelength waveguide lasers at 1064 and 1079 nm in Nd:YAP crystal by direct femtosecond laser writing[J]. Optics Letters, 2015, 40(10): 2437-2440.
- [42] Chen F, de Aldana J R V. Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(2): 251-275.
- [43] Campbell S, Thomson R R, Hand D P, et al. Frequency-doubling in femtosecond laser inscribed periodically-poled potassium titanyl phosphate waveguides[J]. Optics Express, 2007, 15(25): 17146-17150.
- [44] Rodenas A, Kar A K. High-contrast step-index waveguides in borate nonlinear laser crystals by 3D laser writing[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17820-17833.
- [45] Zhang C, Dong N N, Yang J, et al. Channel waveguide lasers in Nd:GGG crystals fabricated by femtosecond laser inscription[J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12503-12508.
- [46] Qi J, Wang P, Liao Y, et al. Fabrication of polarization-independent single-mode waveguides in lithium niobate crystal with femtosecond laser pulses[J]. Optical Materials Express, 2016, 6(8): 2554-2559.
- [47] Grivas C, Ismael R, Corbari C, et al. Generation of multi-gigahertz trains of phase-coherent femtosecond laser pulses in Ti:sapphire waveguides[J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(11): 1800167.
- [48] Dong N N, Chen F, de Aldana J R V. Efficient second harmonic generation by birefringent phase matching in femtosecond-laser-inscribed KTP cladding waveguides[J]. Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters, 2012, 6(7): 306-308.
- [49] Romero C, Garcia Ajates J, Chen F, et al. Fabrication of tapered circular depressed-cladding waveguides in Nd:YAG crystal by femtosecond-laser direct inscription[J]. Micromachines, 2019, 11(1): 10.
- [50] Degl'Innocenti R, Reidt S, Guarino A, et al. Micromachining of ridge optical waveguides on top of He⁺-implanted $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ crystals by femtosecond laser ablation[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(11): 113121.
- [51] Jia Y C, Dong N N, Chen F, et al. Ridge waveguide lasers in Nd:GGG crystals produced by swift carbon ion irradiation and femtosecond laser ablation[J]. Optics Express, 2012, 20(9): 9763-9768.
- [52] Jia Y C, Rüter C E, Akhmaliev S, et al. Ridge waveguide lasers in Nd:YAG crystals produced by combining swift heavy ion irradiation and precise diamond blade dicing[J]. Optical Materials Express, 2013, 3(4): 433-438.
- [53] Jia Y C, Chen F, de Aldana J R V, et al. Femtosecond laser micromachining of Nd:GdCOB ridge waveguides for second harmonic generation[J]. Optical Materials, 2012, 34(11): 1913-1916.
- [54] Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(8): 081101.
- [55] Bi Z F, Wang L, Liu X H, et al. Optical waveguides in TiO_2 formed by He ion implantation[J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6712-6719.
- [56] van Uden R G H, Correa R A, Lopez E A, et al. Ultra-high-density spatial division multiplexing with a few-mode multicore fibre[J]. Nature Photonics, 2014, 8(11): 865-870.
- [57] Trichili A, Park K H, Zghal M, et al. Communicating using spatial mode multiplexing: potentials, challenges, and perspectives[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3175-3203.
- [58] Klaus W, Sakaguchi J, Puttnam B J, et al. Free-space coupling optics for multicore fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(21): 1902-1905.
- [59] Zhu B, Taunay T F, Yan M F, et al. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network[J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11117-11122.
- [60] Flockhart G M H, MacPherson W N, Barton J S, et al. Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber[J]. Optics Letters, 2003, 28(6): 387-389.
- [61] Ding Y H, Ye F H, Peucheret C, et al. On-chip grating coupler array on the SOI platform for fan-in/fan-out of MCFs with low insertion loss and crosstalk[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3292-

- 3298.
- [62] Watanabe T, Hikita M, Kokubun Y. Laminated polymer waveguide fan-out device for uncoupled multi-core fibers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26317-26325.
- [63] Thomson R R, Bookey H T, Psaila N D, et al. Ultrafast-laser inscription of a three dimensional fan-out device for multicore fiber coupling applications[J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11691-11697.
- [64] Thomson R R, Harris R J, Birks T A, et al. Ultrafast laser inscription of a 121-waveguide fan-out for astrophotonics[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2331-2333.
- [65] Lebugle M, Gräfe M, Heilmann R, et al. Experimental observation of N00N state Bloch oscillations[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8273.
- [66] Liang Y Z, Cai C K, Wang K R, et al. Low-insertion-loss femtosecond laser-inscribed three-dimensional high-density mux/demux devices[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(3): 036002.
- [67] Velazquez-Benitez A M, Alvarado J C, Lopez-Galmiche G, et al. Six mode selective fiber optic spatial multiplexer[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1663-1666.
- [68] Park K J, Song K Y, Kim Y K, et al. Broadband mode division multiplexer using all-fiber mode selective couplers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3543-3549.
- [69] Han X, Jiang Y H, Frigg A, et al. Mode and polarization-division multiplexing based on silicon nitride loaded lithium niobate on insulator platform[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(1): 2100529.
- [70] Randel S, Ryf R, Sierra A, et al. 6×56 -Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16697-16707.
- [71] Wang H W, Zhang Y, He Y, et al. Compact silicon waveguide mode converter employing dielectric metasurface structure[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(4): 1801191.
- [72] Chang Z S, Chiang K S. Ultra-broadband mode filters based on graphene-embedded waveguides[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3868-3871.
- [73] Zhang M R, Chen K X, Jin W, et al. Electro-optic mode-selective switch based on cascaded three-dimensional lithium-niobate waveguide directional couplers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35506-35517.
- [74] Riesen N, Gross S, Love J D, et al. Femtosecond direct-written integrated mode couplers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29855-29861.
- [75] Chen Y, Xia K Y, Shen W G, et al. Vector vortex beam emitter embedded in a photonic chip[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(15): 153601.
- [76] Gross S, Riesen N, Love J D, et al. Three-dimensional ultra-broadband integrated tapered mode multiplexers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(5): L81-L85.
- [77] Riesen N, Gross S, Love J D, et al. Monolithic mode-selective few-mode multicore fiber multiplexers[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 6971.
- [78] Gross S, Ross-Adams A, Riesen N, et al. Ultrafast laser-written sub-components for space division multiplexing[C]//*Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group, 2020: W1A. 1.
- [79] Guan B B, Ercan B, Fontaine N K, et al. Mode-group-selective photonic lantern based on integrated 3D devices fabricated by ultrafast laser inscription[C]//*Optical Fiber Communication Conference*, March 22–26, 2015, Los Angeles, California. Washington, DC: OSA, 2015: W2A.16.
- [80] Li Z Z, Ouyang Y, Li Z T, et al. Three-dimensional on-chip mode converter[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(5): 1140-1143.
- [81] Nolte S, Will M, Burghoff J, et al. Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics[J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(1): 109-111.
- [82] Pospiech M, Emons M, Väckenstedt B, et al. Single-sweep laser writing of 3D-waveguide devices[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6994-7001.
- [83] Sakakura M, Sawano T, Shimotsuma Y, et al. Fabrication of three-dimensional 1×4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated laser beam[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12136-12143.
- [84] Yuan W H, Lü J M, Hao X T, et al. Optimization of waveguide structures for beam splitters fabricated in fused silica by direct femtosecond-laser inscription[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 74: 60-64.
- [85] Mittholiya K, Anshad P K, Mallik A K, et al. Inscription of waveguides and power splitters in borosilicate glass using ultrashort laser pulses[J]. *Journal of Optics*, 2017, 46(3): 304-310.
- [86] Lü J M, Cheng Y Z, Yuan W H, et al. Three-dimensional femtosecond laser fabrication of waveguide beam splitters in LiNbO_3 crystal[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(6): 1274-1280.
- [87] Ajates J G, de Aldana J R V, Chen F, et al. Three-dimensional beam-splitting transitions and numerical modelling of direct-laser-written near-infrared LiNbO_3 cladding waveguides[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(7): 1890-1901.
- [88] Lü J M, Cheng Y Z, de Aldana J R V, et al. Femtosecond laser writing of optical-lattice-like cladding structures for three-dimensional waveguide beam splitters in LiNbO_3 crystal[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(15): 3587-3591.
- [89] Nie W J, Jia Y C, de Aldana J R V, et al. Efficient second harmonic generation in 3D nonlinear optical-lattice-like cladding waveguide splitters by femtosecond laser inscription[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22310.
- [90] Qiang X G, Zhou X Q, Wang J W, et al. Large-scale silicon quantum photonics implementing arbitrary two-qubit processing[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(9): 534-539.
- [91] Feng L T, Zhang M, Xiong X, et al. Transverse mode-encoded quantum gate on a silicon photonic chip[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(6): 060501.
- [92] Zhang Q, Li M, Chen Y, et al. Femtosecond laser direct writing of an integrated path-encoded CNOT quantum gate[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(5): 2318-2326.
- [93] Crespi A, Ramponi R, Osellame R, et al. Integrated photonic quantum gates for polarization qubits[J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 566.
- [94] Meany T, Biggerstaff D N, Broome M A, et al. Engineering integrated photonics for heralded quantum gates[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25126.
- [95] Spagnolo N, Vitelli C, Aparo L, et al. Three-photon bosonic coalescence in an integrated tritter[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1606.
- [96] Li M, Li C, Chen Y, et al. On-chip path encoded photonic quantum Toffoli gate[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(7): 1533-1542.
- [97] Poullos K, Keil R, Fry D, et al. Quantum walks of correlated photon pairs in two-dimensional waveguide arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(14): 143604.
- [98] Tang H, Lin X F, Feng Z, et al. Experimental two-dimensional quantum walk on a photonic chip[J]. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaat3174.
- [99] Max E, Robert K, Maczewsky L J, et al. Exploring complex graphs using three-dimensional quantum walks of correlated photons[J]. *Science Advances*, 2021, 7(9): eabc5266.
- [100] Crespi A, Osellame R, Ramponi R, et al. Suppression law of quantum states in a 3D photonic fast Fourier transform chip[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10469.
- [101] Tang H, di Franco C, Shi Z Y, et al. Experimental quantum fast hitting on hexagonal graphs[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(12): 754-758.

- [102] Lu L, Joannopoulos J D, Soljačić M. Topological photonics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 821-829.
- [103] 王洪飞, 解碧野, 詹鹏, 等. 拓扑光子学研究进展[J]. *物理学报*, 2019, 68(22): 224206.
Wang H F, Xie B Y, Zhan P, et al. Research progress of topological photonics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(22): 224206.
- [104] Zeuner J M, Rechtsman M C, Plotnik Y, et al. Observation of a topological transition in the bulk of a non-Hermitian system[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(4): 040402.
- [105] Maczewsky L J, Heinrich M, Kremer M, et al. Nonlinearity-induced photonic topological insulator[J]. *Science*, 2020, 370(6517): 701-704.
- [106] Bland-Hawthorn J, Kern P. Astrophotonics: a new era for astronomical instruments[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1880-1884.
- [107] Thomson R R, Birks T A, Leon-Saval S G, et al. Ultrafast laser inscription of an integrated photonic lantern[J]. *Optics express*, 2011, 19(6): 5698-5705.
- [108] Jovanovic N, Spaleniak I, Gross S, et al. Integrated photonic building blocks for next-generation astronomical instrumentation I: the multimode waveguide[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 17029-17043.
- [109] Spaleniak I, Jovanovic N, Gross S, et al. Integrated photonic building blocks for next-generation astronomical instrumentation II: the multimode to single mode transition[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27197-27208.
- [110] Spaleniak I, Gross S, Jovanovic N, et al. Multiband processing of multimode light: combining 3D photonic lanterns with waveguide Bragg gratings[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(1): L1-L5.
- [111] Diener R, Tepper J, Labadie L, et al. Towards 3D-photonics, multi-telescope beam combiners for mid-infrared astrointerferometry[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19262-19274.
- [112] Martinod M A, Norris B, Tuthill P, et al. Scalable photonic-based nulling interferometry with the dispersed multi-baseline GLINT instrument[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2465.
- [113] Tai H, Yoshino T, Tanaka H. Fiber-optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392- μm line of a He-Ne laser[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(6): 437-439.
- [114] Heo J, Rodrigues M, Saggese S J, et al. Remote fiber-optic chemical sensing using evanescent-wave interactions in chalcogenide glass fibers[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(27): 3944-3951.
- [115] Bilro L, Alberto N, Pinto J L, et al. A simple and low-cost cure monitoring system based on a side-polished plastic optical fibre[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(11): 117001.
- [116] Ribeiro R M, Canedo J L P, Werneck M M, et al. An evanescent-coupling plastic optical fibre refractometer and absorptionmeter based on surface light scattering[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, 101(1/2): 69-76.
- [117] Crespi A, Gu Y, Ngamsom B, et al. Three-dimensional Mach-Zehnder interferometer in a microfluidic chip for spatially-resolved label-free detection[J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(9): 1167-1173.
- [118] Khalil A A, Lalanne P, Bérubé J P, et al. Femtosecond laser writing of near-surface waveguides for refractive-index sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31130-31143.
- [119] Zhang Y F, Lin C P, Liao C R, et al. Femtosecond laser-inscribed fiber interface Mach-Zehnder interferometer for temperature-insensitive refractive index measurement[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4421-4424.
- [120] Li W W, Chen W P, Wang D N, et al. Fiber inline Mach-Zehnder interferometer based on femtosecond laser inscribed waveguides[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4438-4441.
- [121] Zhao Y, Zhao J, Wang X X, et al. Femtosecond laser-inscribed fiber-optic sensor for seawater salinity and temperature measurements[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 353: 131134.
- [122] He J, He J, Xu X Z, et al. Single-mode helical Bragg grating waveguide created in a multimode coreless fiber by femtosecond laser direct writing[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 2052-2059.
- [123] Tan D Z, Sun X Y, Li Z L, et al. Effectively writing low propagation and bend loss waveguides in the silica glass by using a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(18): 4766-4769.
- [124] Eaton S M, Ng M L, Bonse J, et al. Low-loss waveguides fabricated in BK7 glass by high repetition rate femtosecond fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2098-2102.
- [125] Tan D Z, Sun X Y, Wang Q, et al. Fabricating low loss waveguides over a large depth in glass by temperature gradient assisted femtosecond laser writing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 3941-3944.
- [126] Khalid M, Chen G Y, Ebendorff-Heidepreim H, et al. Femtosecond laser induced low propagation loss waveguides in a lead-germanate glass for efficient lasing in near to mid-IR[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 10742.
- [127] Yang W J, Corbari C, Kazansky P G, et al. Low loss photonic components in high index bismuth borate glass by femtosecond laser direct writing[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 16215-16226.
- [128] Lapointe J, Ledemi Y, Loranger S, et al. Fabrication of ultrafast laser written low-loss waveguides in flexible As_2S_3 chalcogenide glass tape[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 203-206.
- [129] Li Z Q, Cheng C, Romero C, et al. Low-loss optical waveguides in β -BBO crystal fabricated by femtosecond-laser writing[J]. *Optical Materials*, 2017, 73: 45-49.
- [130] Jia Y C, He R Y, de Aldana J R V, et al. Femtosecond laser direct writing of few-mode depressed-cladding waveguide lasers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 30941-30951.
- [131] Ince F D, Morova Y, Yazlar U, et al. Femtosecond laser writing of low-loss waveguides with different geometries in diamond[J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 135: 109894.
- [132] Piromitpong T, Dubov M, Boscolo S. High-repetition-rate femtosecond-laser inscription of low-loss thermally stable waveguides in lithium niobate[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(5): 302.
- [133] Ren Y Y, Cui Z M, Sun L F, et al. Laser emission from low-loss cladding waveguides in Pr: YLF by femtosecond laser helical inscription[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(12): 122201.
- [134] Okhrimchuk A, Mezentssev V, Shestakov A, et al. Low loss depressed cladding waveguide inscribed in YAG: Nd single crystal by femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3832-3843.
- [135] Pätzold W M, Reinhardt C, Demircan A, et al. Cascaded-focus laser writing of low-loss waveguides in polymers[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1269-1272.
- [136] Li Z Z, Tian Z N, Li Z T, et al. Photon propagation control on laser-written photonic chips enabled by composite waveguides[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(5): 829-838.
- [137] Zheltikov A M, Reid D T. Weak-guidance-theory review of dispersion and birefringence management by laser inscription[J]. *Laser Physics Letters*, 2008, 5(1): 11-20.
- [138] Hnatovsky C, Taylor R S, Simova E, et al. High-resolution study of photoinduced modification in fused silica produced by a tightly focused femtosecond laser beam in the presence of aberrations[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(1): 013517.
- [139] Gross S, Ams M, Palmer G, et al. Ultrafast laser inscription in soft glasses: a comparative study of athermal and thermal processing regimes for guided wave optics[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2012, 3(4): 332-348.
- [140] Qiu J R. Femtosecond laser-induced microstructures in glasses and applications in micro-optics[J]. *The Chemical Record*, 2004, 4(1): 50-58.
- [141] Psaila N D, Thomson R R, Bookey H T, et al. Femtosecond

- laser inscription of optical waveguides in bismuth ion doped glass [J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10452-10459.
- [142] Liu J R, Zhang Z Y, Fluoraru C, et al. Waveguide shaping and writing in fused silica using a femtosecond laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(1): 169-173.
- [143] Osellame R, Taccheo S, Marangoni M, et al. Femtosecond writing of active optical waveguides with astigmatically shaped beams[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2003, 20(7): 1559-1567.
- [144] Cheng Y, Sugioka K, Midorikawa K, et al. Control of the cross-sectional shape of a hollow microchannel embedded in photostructurable glass by use of a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(1): 55-57.
- [145] Ferrer A, Diez-Blanco V, Ruiz A, et al. Deep subsurface optical waveguides produced by direct writing with femtosecond laser pulses in fused silica and phosphate glass[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254(4): 1121-1125.
- [146] Yu F, Wang L C, Chen Y, et al. Polarization independent quantum devices with ultra-low birefringence glass waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(5): 1451-1457.
- [147] de la Cruz A R, Ferrer A, Gawelda W, et al. Independent control of beam astigmatism and ellipticity using a SLM for fs-laser waveguide writing[J]. *Optics Express*, 2009, 17(23): 20853-20859.
- [148] Salter P S, Baum M, Alexeev I, et al. Exploring the depth range for three-dimensional laser machining with aberration correction[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17644-17656.
- [149] Simmonds R D, Salter P S, Jesacher A, et al. Three dimensional laser microfabrication in diamond using a dual adaptive optics system[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24122-24128.
- [150] Li Z Z, Li X Y, Yu F, et al. Circular cross section waveguides processed by multi-foci-shaped femtosecond pulses[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 520-523.
- [151] Sun B S, Morozko F, Salter P S, et al. On-chip beam rotators, adiabatic mode converters, and waveplates through low-loss waveguides with variable cross-sections[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 214.
- [152] Huang L, Salter P S, Payne F, et al. Aberration correction for direct laser written waveguides in a transverse geometry[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10565-10574.
- [153] Feng Z, Wu B H, Zhao Y X, et al. Invisibility cloak printed on a photonic chip[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28527.
- [154] Li G Y, Winick K A, Said A A, et al. Waveguide electro-optic modulator in fused silica fabricated by femtosecond laser direct writing and thermal poling[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 739-741.
- [155] Humphreys P C, Metcalf B J, Spring J B, et al. Strain-optic active control for quantum integrated photonics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21719-21726.
- [156] Flamini F, Magrini L, Rab A S, et al. Thermally reconfigurable quantum photonic circuits at telecom wavelength by femtosecond laser micromachining[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(11): e354.
- [157] Chaboyer Z, Meany T, Helt L G, et al. Tunable quantum interference in a 3D integrated circuit[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9601.
- [158] Ceccarelli F, Atzeni S, Pentangelo C, et al. Low power reconfigurability and reduced crosstalk in integrated photonic circuits fabricated by femtosecond laser micromachining[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(10): 2000024.

Three-Dimensional Femtosecond-Laser Direct-Written Optical Waveguide: Advancements and Challenges (Invited)

Li Zezheng¹, Guo Shuaipeng¹, Jiang Chuang², Ke Shaolin², Tian Zhennan^{1*}

¹State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;

²Hubei Key Laboratory of Optical Information and Pattern Recognition, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China

Abstract

Significance With the development of emerging applications, such as artificial intelligence (AI), automatic drive, and high-speed computing, the information transmission capacity and processing speed required by human society are increasing exponentially. Hence, photonics is expected to be a new approach to information transfer and processing in the future for the multiple-encoding degrees of freedom, low power consumption, ultrahigh-speed information transmission, and high parallelism in information processing. Compared with traditional bulky optical systems, photonic integrated circuits (PICs) have a low loss, multifunctionality, high degree of integration, and compact size. These advantages have attracted attention from scientists worldwide. Apart from the significant progresses made in two-dimensional (2D) PICs, a rapid development trend in three-dimensional (3D) PICs consisting of 2D and 3D waveguide devices is being witnessed.

With its 3D processing capability, femtosecond-laser direct writing facilitates the transformation of PICs from 2D into 3D. This transformation provides not only a direct solution for the improvement of chip integration in the physical space but also new physical degrees-of-freedom design to achieve more complex on-chip photonic manipulation methods. Compared to 2D optical waveguide devices, 3D optical waveguide devices offer a new three-dimensional architecture for photonic chips, enabling three-dimensional integration. By spatially combining waveguide devices, multiple degrees-of-freedom of photons can be fully achieved. By writing

designed optical waveguide arrays, it is possible to construct Hamiltonians, enabling the direct simulation of quantum and topological phenomena in optical systems. With these advantages, 3D PICs have important applications in various fields, including optical communications, integrated quantum optics, topological optics, astrophotonic, and optical sensing.

Progress We reviewed the research progress of femtosecond-laser direct writing for 3D PICs. First, we introduced the mechanism of interaction between the femtosecond laser and transparent materials. On this basis, four types of femtosecond-laser direct-writing waveguides were introduced. Finally, we extensively reviewed the important applications and recent progress in 3D PICs in various fields.

Conclusions and Prospects 3D femtosecond-laser direct-writing PICs provides a crucial solution for manipulating optical information. However, significant scientific and technical problems must be addressed before practical applications can be achieved. For example, the spherical aberration and Kerr nonlinearity that hinder the high-quality fabrication of 3D waveguides need to be addressed. In addition, the dynamic modulation efficiency of 3D PICs is limited by the large spacing between the surface and internal components. If these problems are solved in the near future, the femtosecond-laser direct-writing technique can be fully utilized in fabricating 3D PICs, with significant economic benefits to human society.

Key words integrated optics; photonic integrated chips; femtosecond laser direct-writing; three-dimensional optical waveguide